



Sztuczne sieci neuronowe

Wprowadzenie

XXII Festiwal Nauki, Techniki i Sztuki, Łódź, 20 kwietnia 2023



WYDZIAŁ
MATEMATYKI
i INFORMATYKI
Uniwersytet Łódzki

Piotr Fulmański
Konrad Kosmatka

Plan spotkania



1. Po co i dlaczego
2. Naturalne sieci neuronowe
3. Sztuczne sieci neuronowe
4. Część praktyczna



Po co i dlaczego

Po co?



Naśladowanie rozwiązań występujących w naturze aby rozwiązać różne problemy:

- DaVinci i model maszyny latającej,
- velcro,
- echolokacja,
- termitiery,
- ...

Biomimetyka lub *biomimikra* to emulacja modeli, systemów i elementów przyrody w celu rozwiązywania złożonych problemów człowieka. Terminy wywodzą się ze starożytnej greki: βίος – życie i μίμησης – naśladowanie, μῦθος – aktor.



Dlaczego?



Nie znamy algorytmicznego sposobu rozwiązywania pewnych problemów.



Dlaczego?



Sieci neuronowe są w obecnych czasach popularnym przedmiotem badań naukowców, czy praktycznej implementacji przez inżynierów.

Co więcej, są używane przez każdego z nas w życiu codziennym, mniej lub bardziej świadomie.



Dlaczego?

Analiza obrazów



Classification



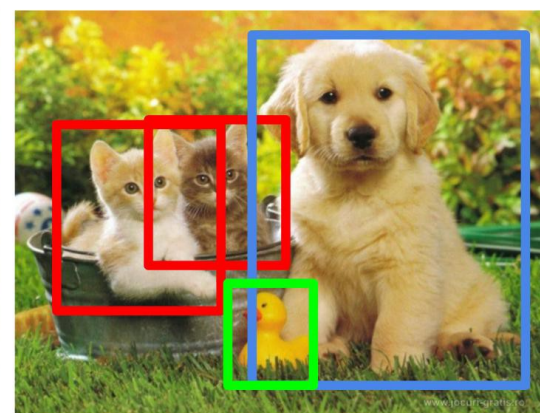
CAT

**Classification
+ Localization**



CAT

Object Detection



CAT, DOG, DUCK

Instance Segmentation



CAT, DOG, DUCK

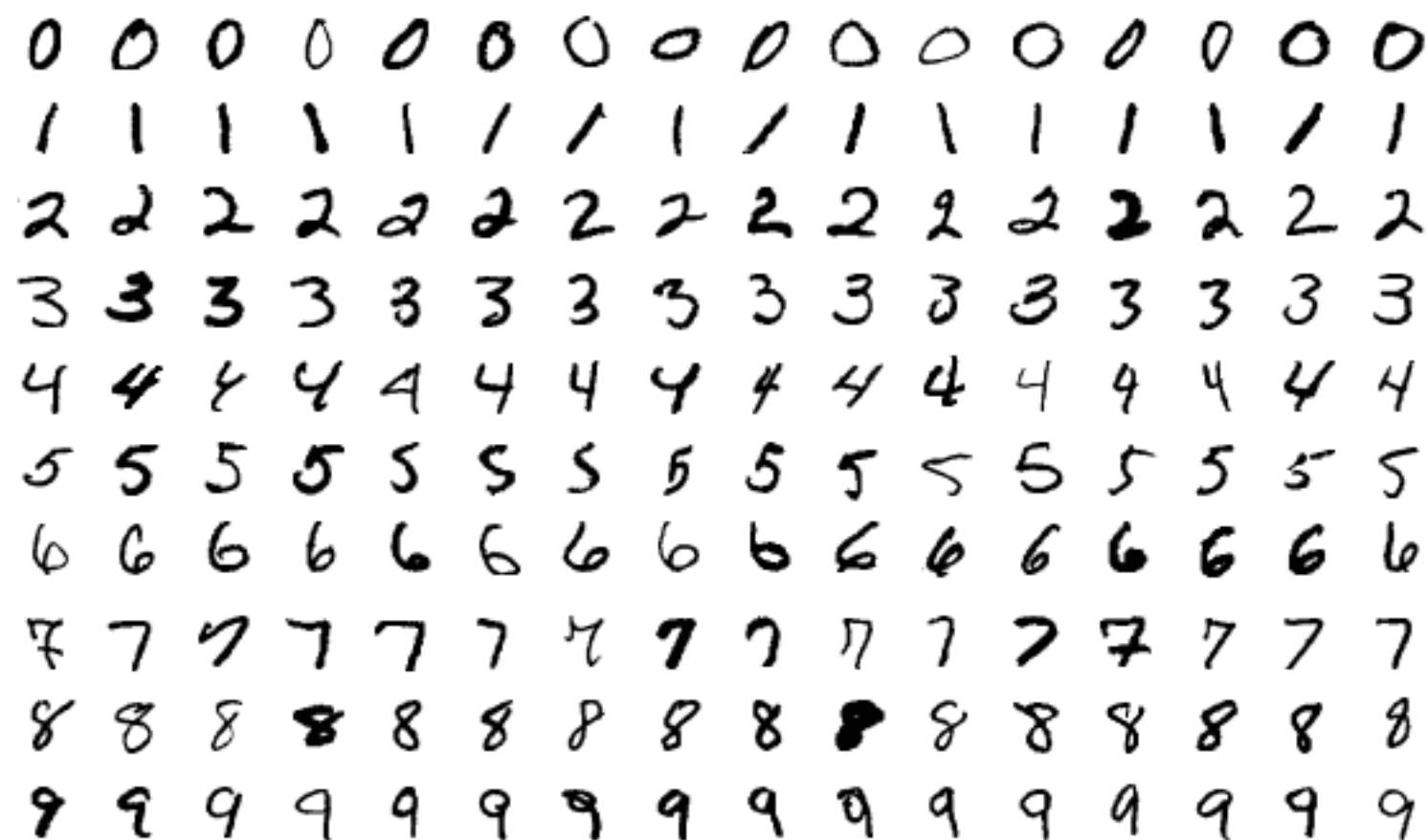
Single object

Multiple objects



Dlaczego?

Rozpoznawanie pisma



Dlaczego?

Inne zastosowania

Inne zastosowania to:

- eksploracja danych (kojarzenie, kategoryzowanie, wyszukiwanie),
- generowanie realistycznych obrazów,
- sterowanie systemami (np. autonomiczne pojazdy),
- prognozowanie (np. ekonomiczne),
- diagnozowanie chorób,
- ... i wiele, wiele innych.



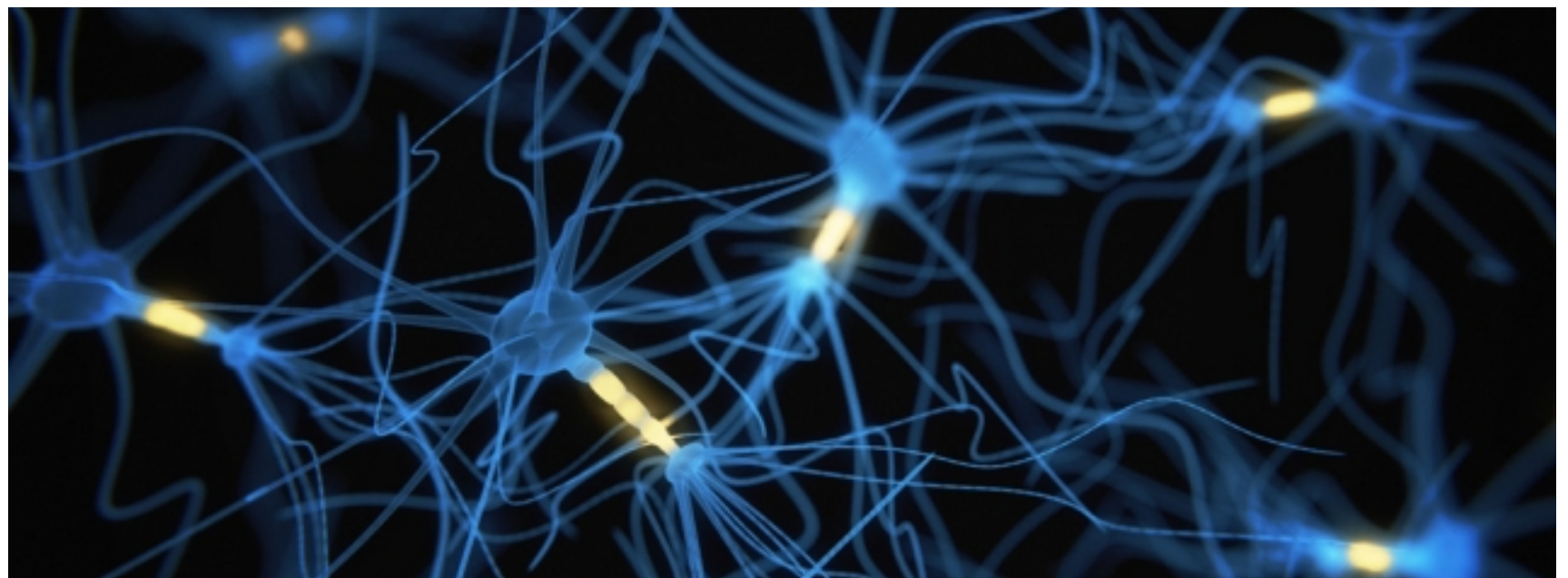
Naturalne sieci neuronowe

Naturalne sieci neuronowe

Wprowadzenie – biologiczna sieć neuronowa

Wszystkie akcje ludzi i zwierząt są koordynowane przez nasz wewnętrzny "procesor", tj. **mózg**. Jego wewnętrzna struktura, czyli *biologiczna sieć neuronowa* jest zbudowana z:

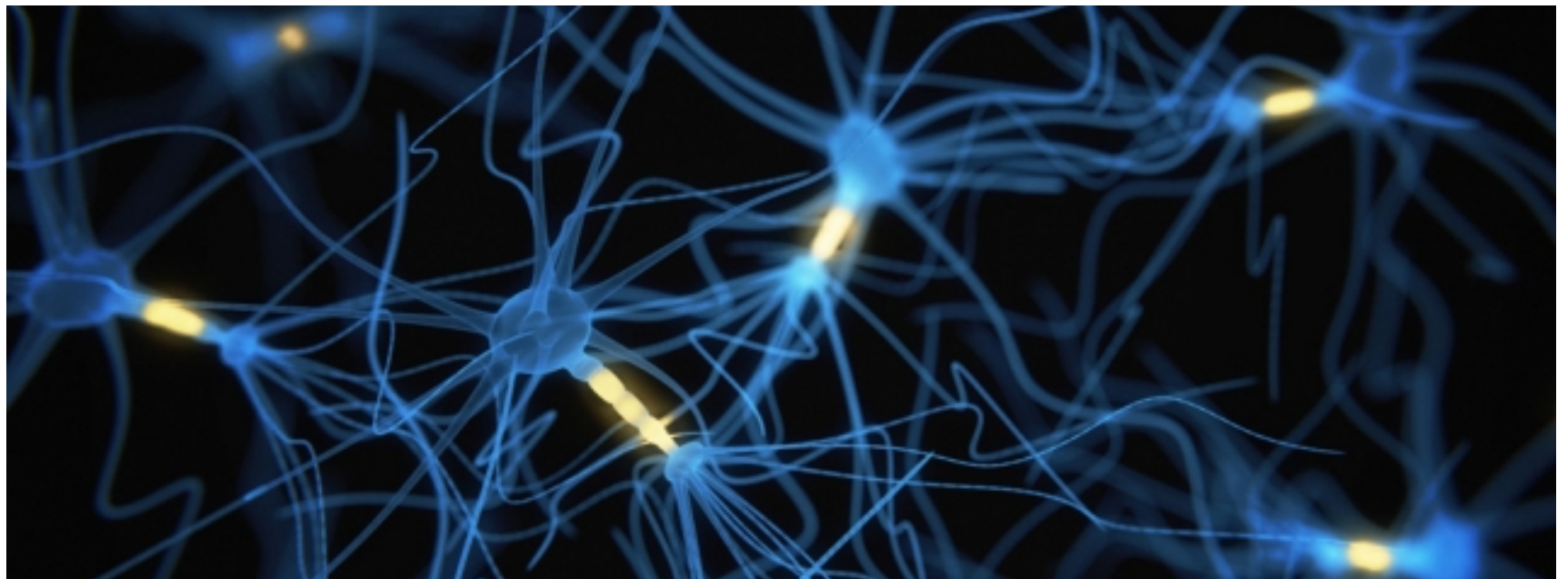
- komórek nerwowych – neuronów,
- komórek glejowych.



Naturalne sieci neuronowe

Wprowadzenie – biologiczna sieć neuronowa

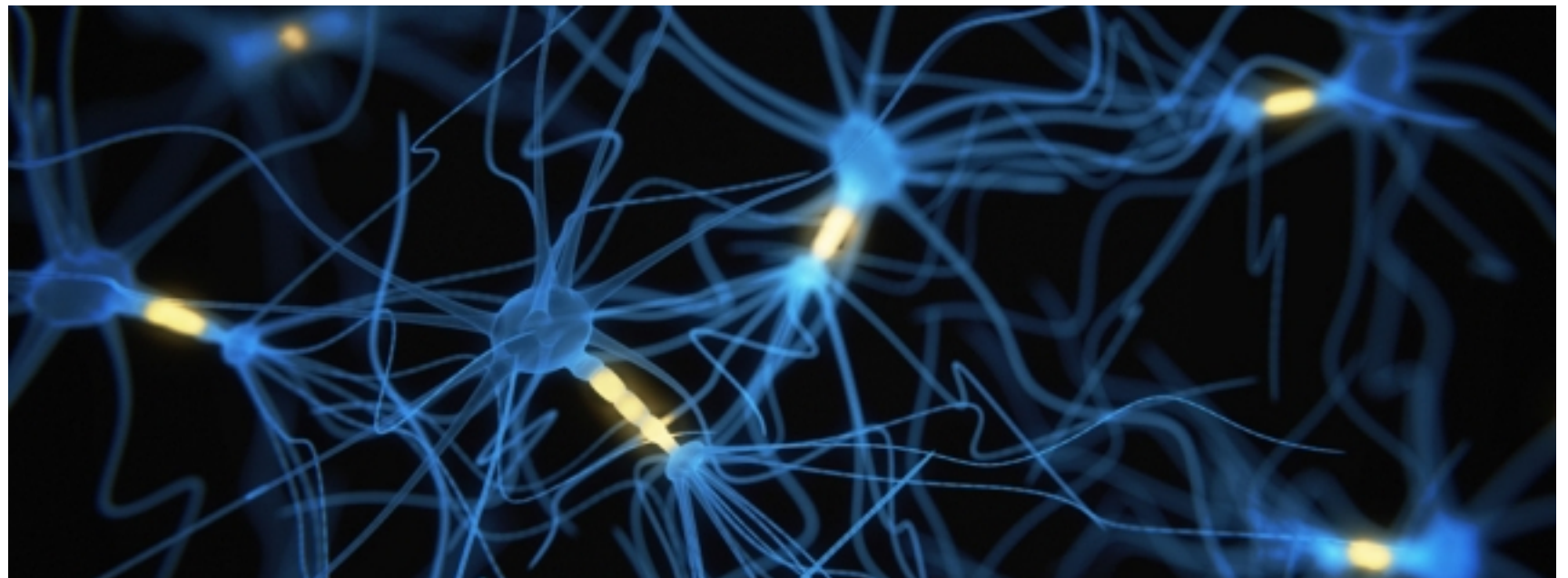
Neurony (komórki nerwowe) posiadają zdolność do odbierania, przetwarzania i przekazywania sygnałów elektrochemicznych. Komórki tego typu różnią się między sobą czasem nawet bardzo istotnie kształtem, rozmiarem i własnościami.



Naturalne sieci neuronowe

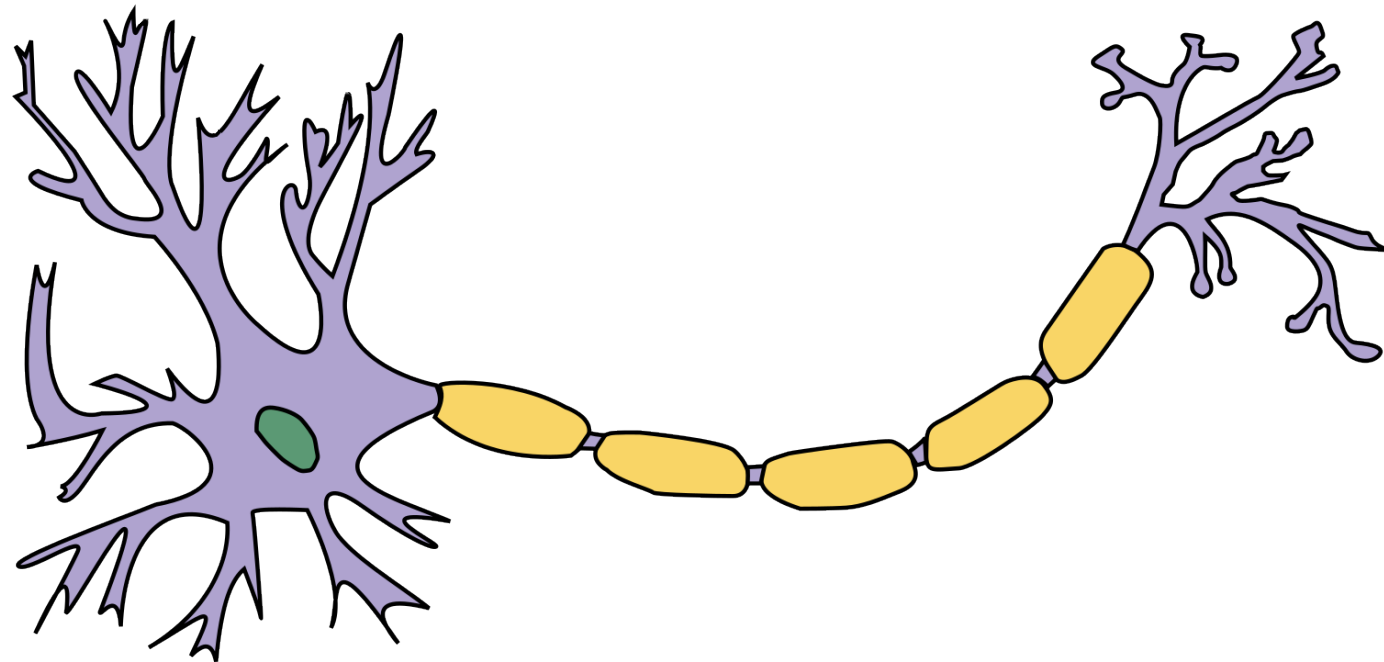
Wprowadzenie – biologiczna sieć neuronowa

Komórki glejowe stanowią "wypełniacz" przestrzeni, w której występują neurony. Chronią tkanki nerwowe i zaopatrują je w substancje odżywcze.



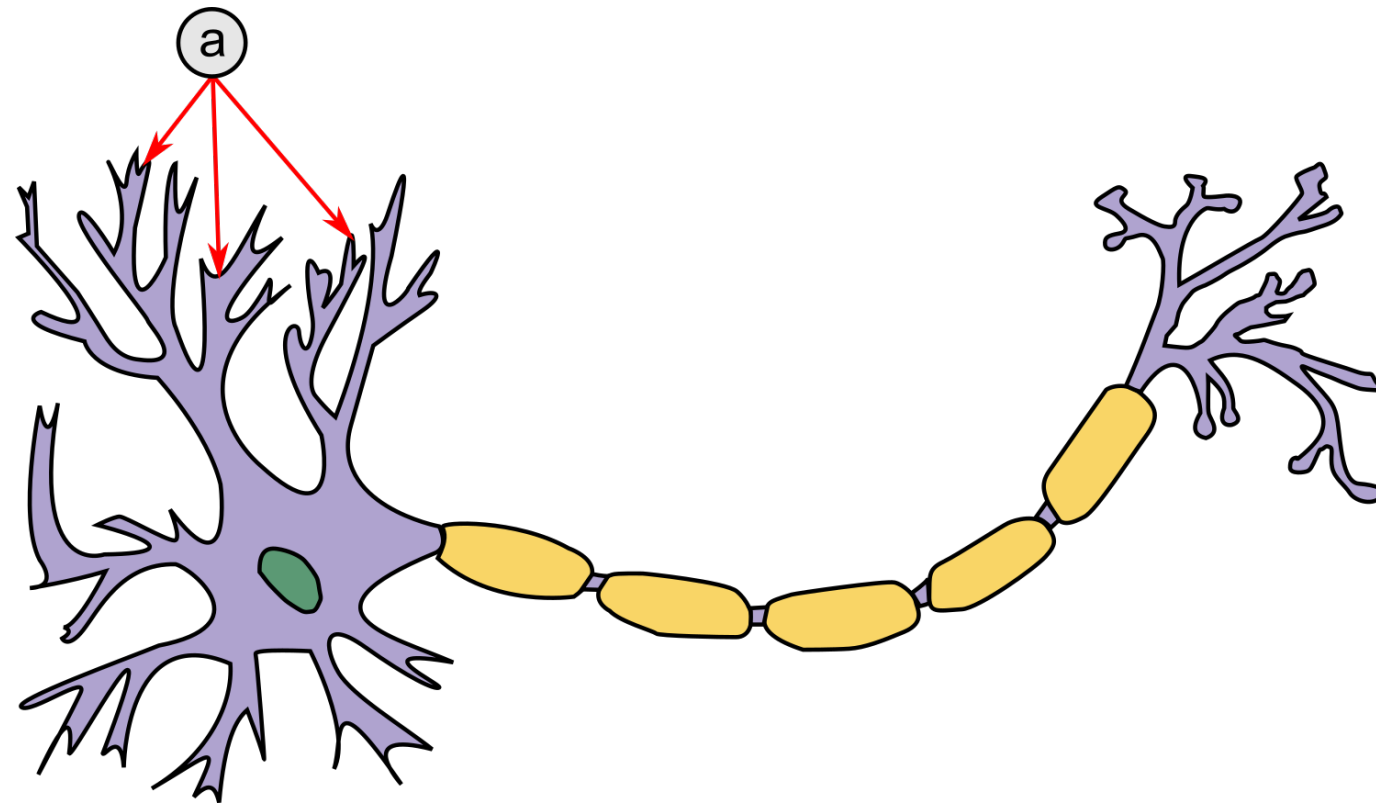
Naturalne sieci neuronowe

Budowa neuronu – biologiczny neuron



Naturalne sieci neuronowe

Budowa neuronu – biologiczny neuron

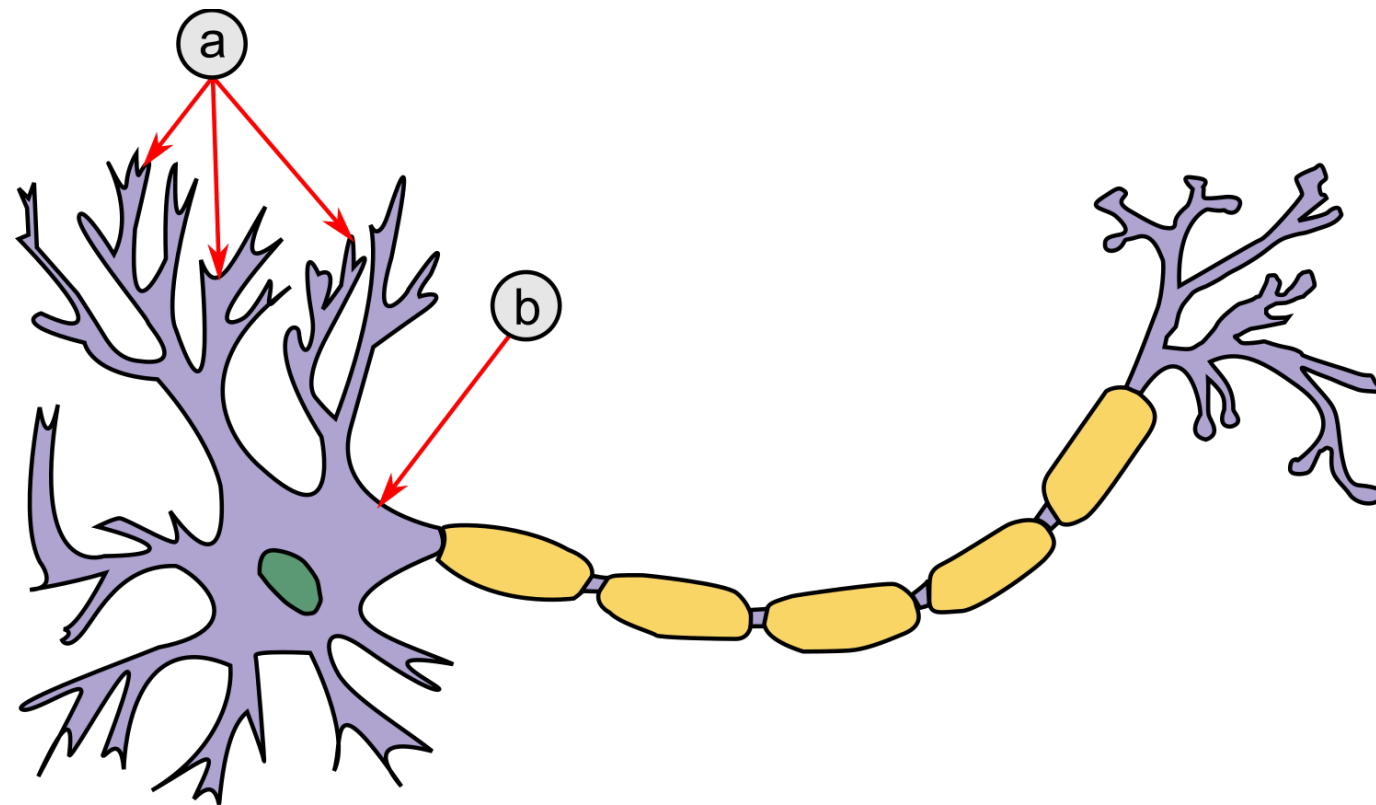


Dendryty stanowią rozgałęzienie ciała komórki neuronu i **służą do odbioru sygnałów** od innych neuronów. Ich ilość wynosi *kilka tysięcy* (dla jednego neuronu).



Naturalne sieci neuronowe

Budowa neuronu – biologiczny neuron

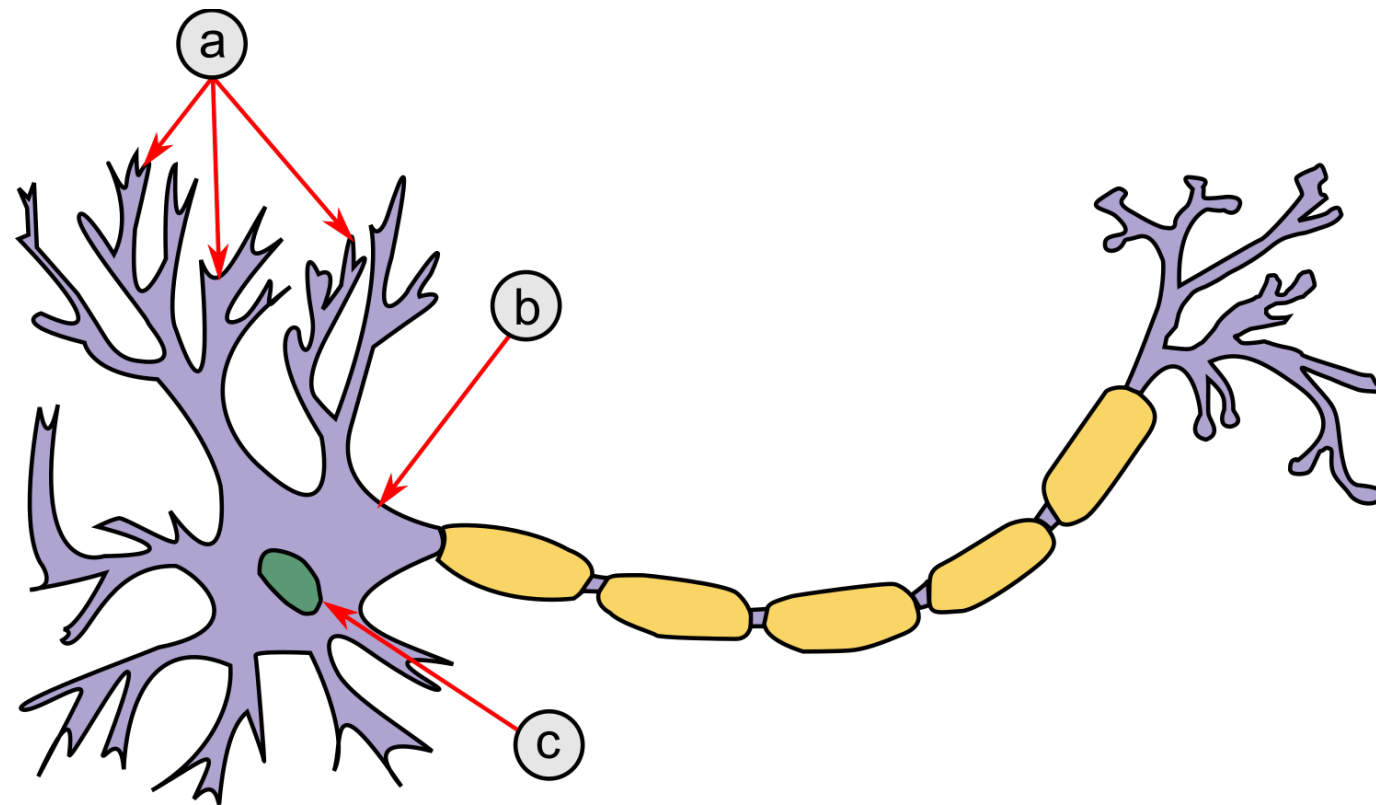


Ciało komórki zawiera wszystkie struktury, potrzebne do biologicznego funkcjonowania komórki (jądro, rybosomy, mitochondrium) i stanowi **element przetwarzający sygnały**.



Naturalne sieci neuronowe

Budowa neuronu – biologiczny neuron



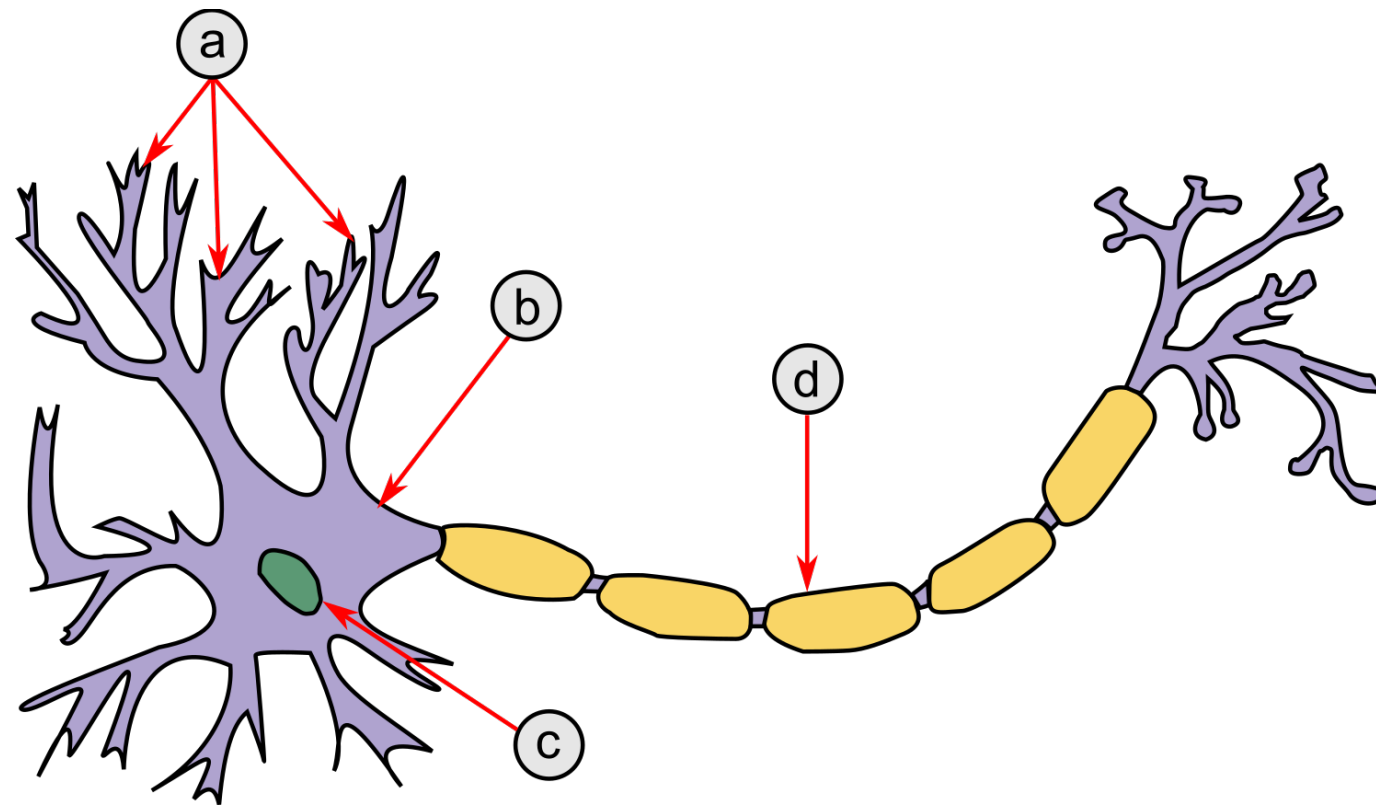
Jądro komórkowe przechowuje i powiela informację genetyczną, a także kontroluje czynności komórki. Jego obumarcie oznacza śmierć komórki.

W modelu matematycznym nie występuje samodzielnie.



Naturalne sieci neuronowe

Budowa neuronu – biologiczny neuron

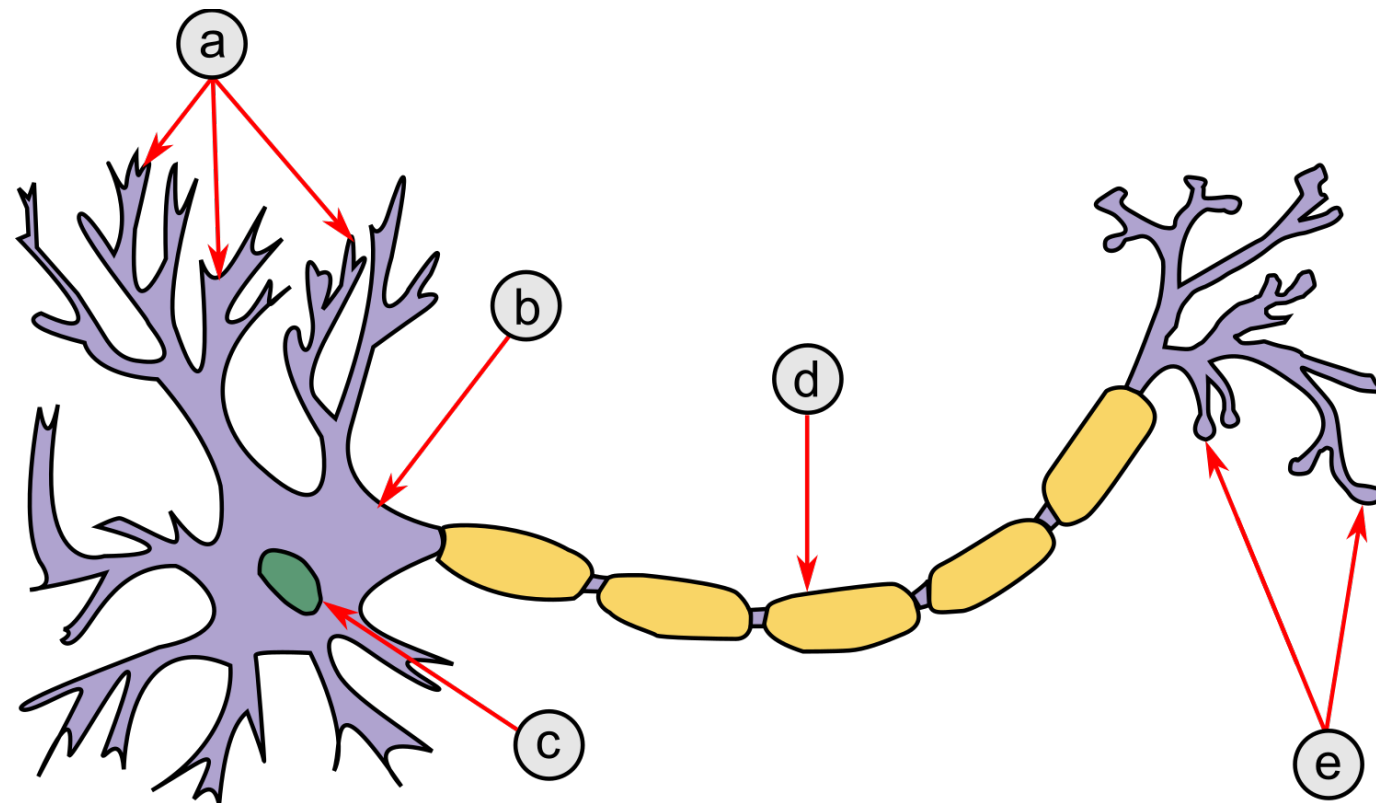


Akson pełni rolę **elementu wyjściowego** przekazując impulsy elektrochemiczne na zewnątrz komórki. Jego długość jest kilka lub kilkadziesiąt razy większa niż średnica ciała komórki.



Naturalne sieci neuronowe

Budowa neuronu – biologiczny neuron



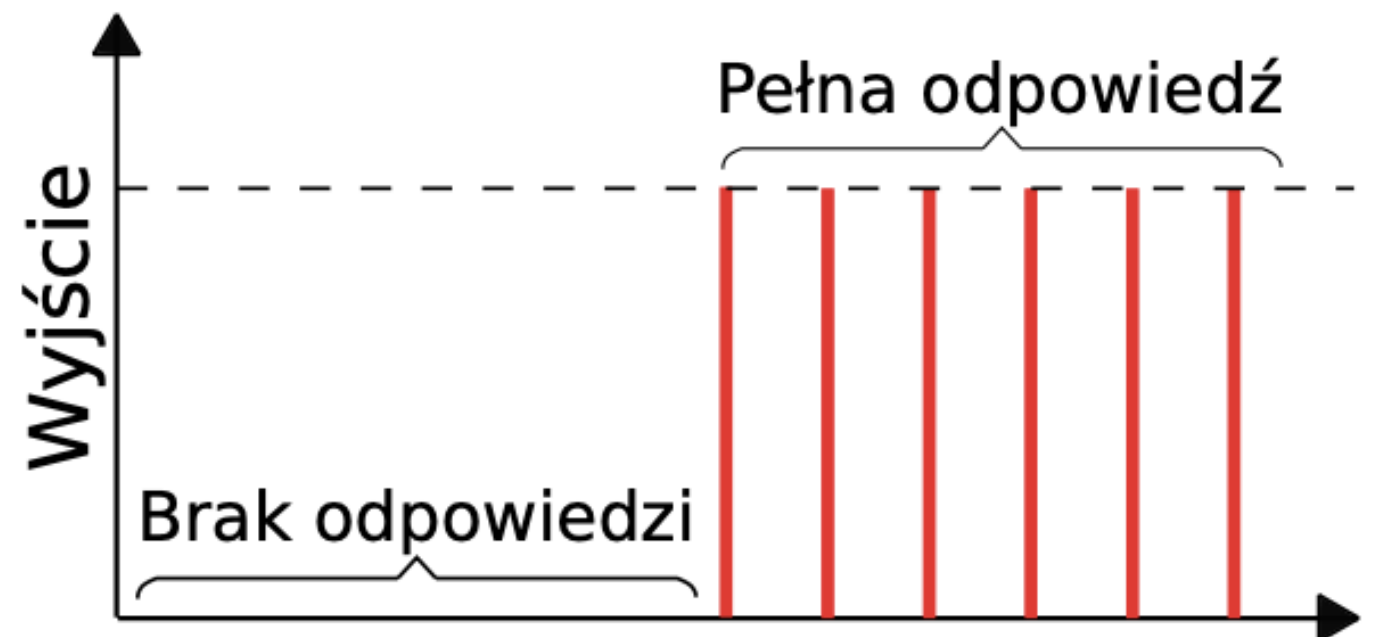
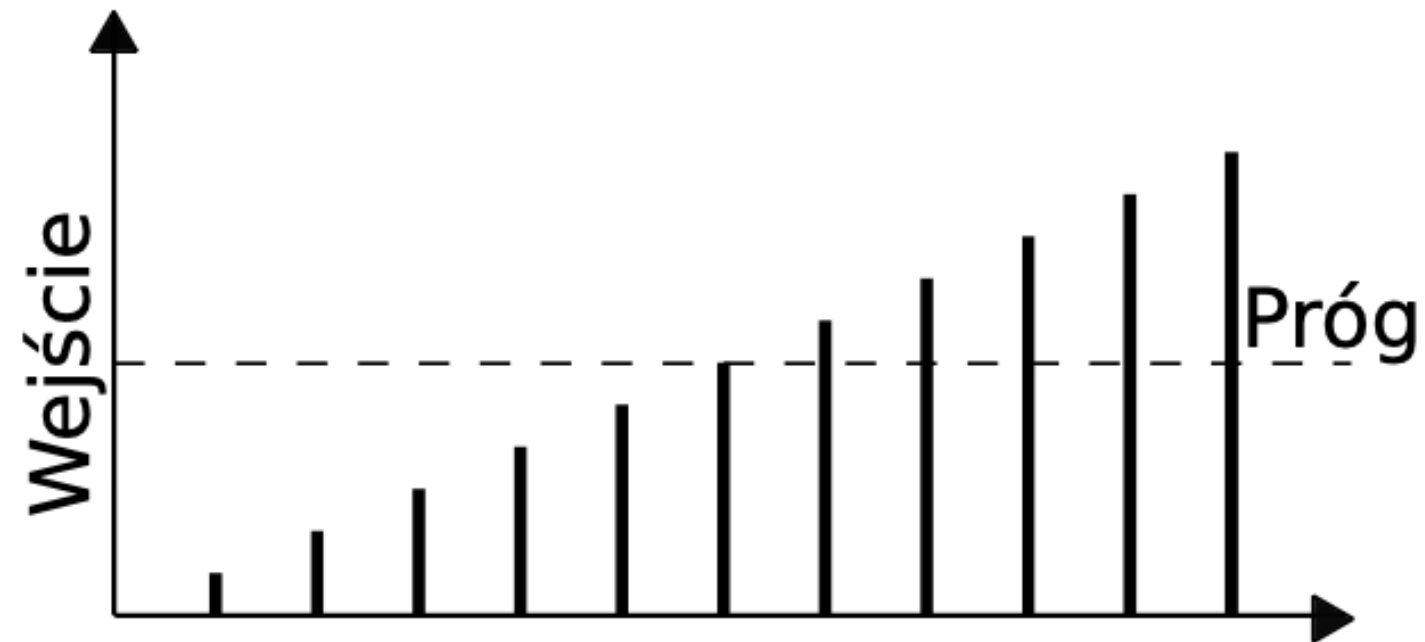
Synapsy to rozgałęzienia aksonu, w których dochodzi do zamiany sygnału elektrycznego na sygnał chemiczny, a następnie do jego przekazania z jednej komórki do innej. W procesie tym sygnał może ulec wzmocnieniu lub osłabieniu a więc synapsy pełnią rolę **elementu ważącego**.

Naturalne sieci neuronowe

Zasada działania neuronu – wszystko albo nic



Neuron przekaże sygnał tylko po przekroczeniu pewnego poziomu impulsów wejściowych.

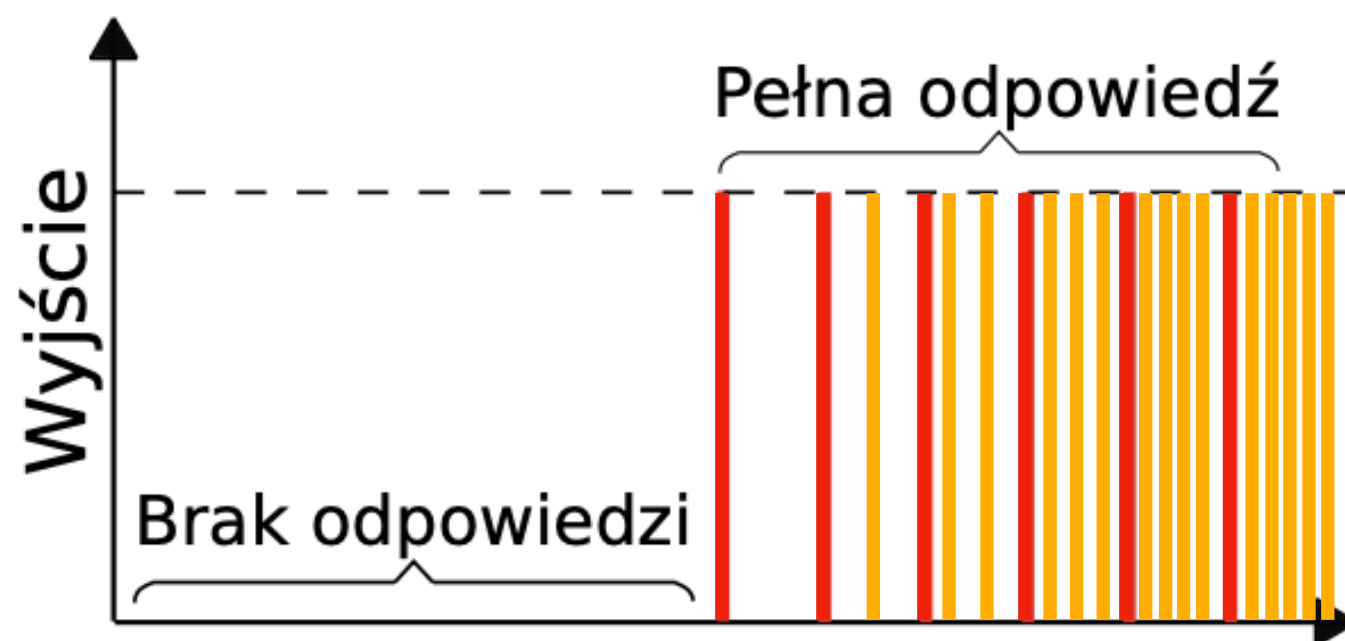
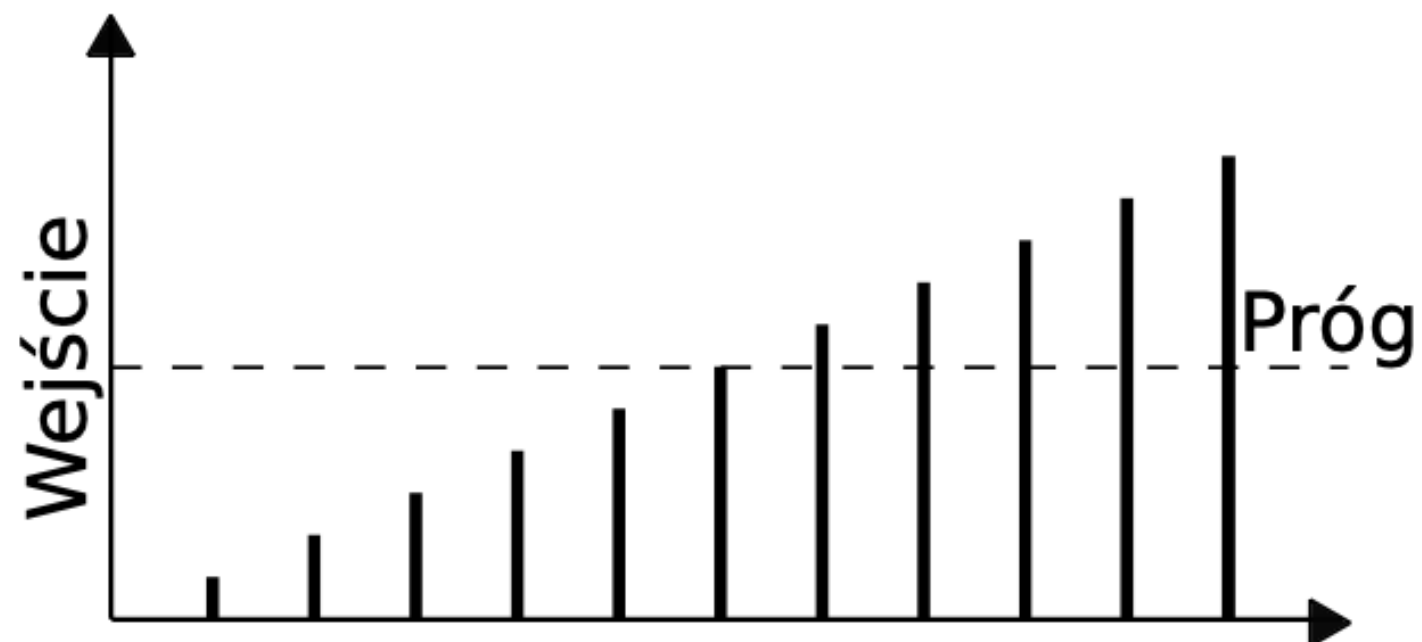


Naturalne sieci neuronowe

Zasada działania neuronu – wszystko albo nic

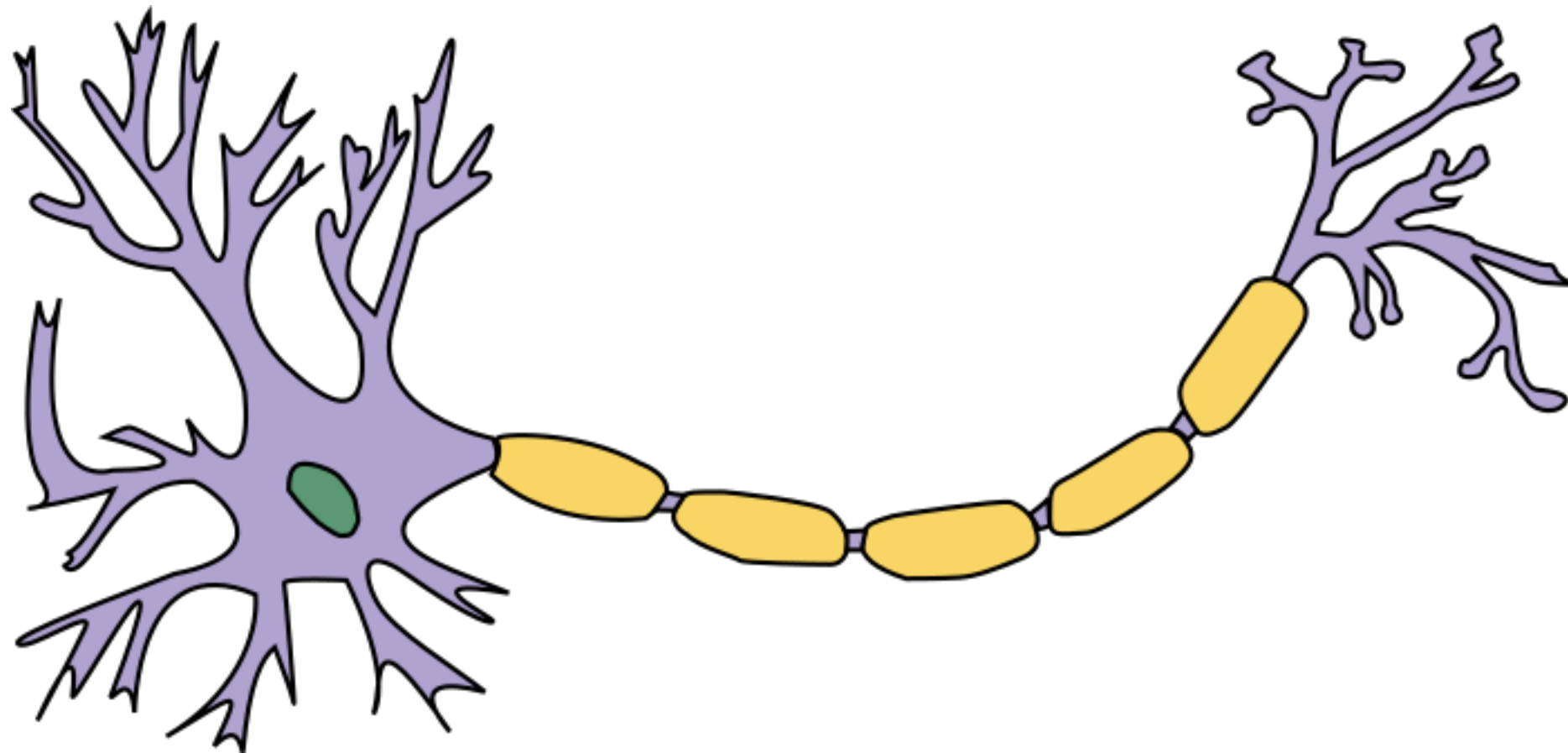


Silniejsza stymulacja neuronów nie prowadzi do wytwarzania silniejszych potencjałów, ale do zwiększenia ich częstotliwości.



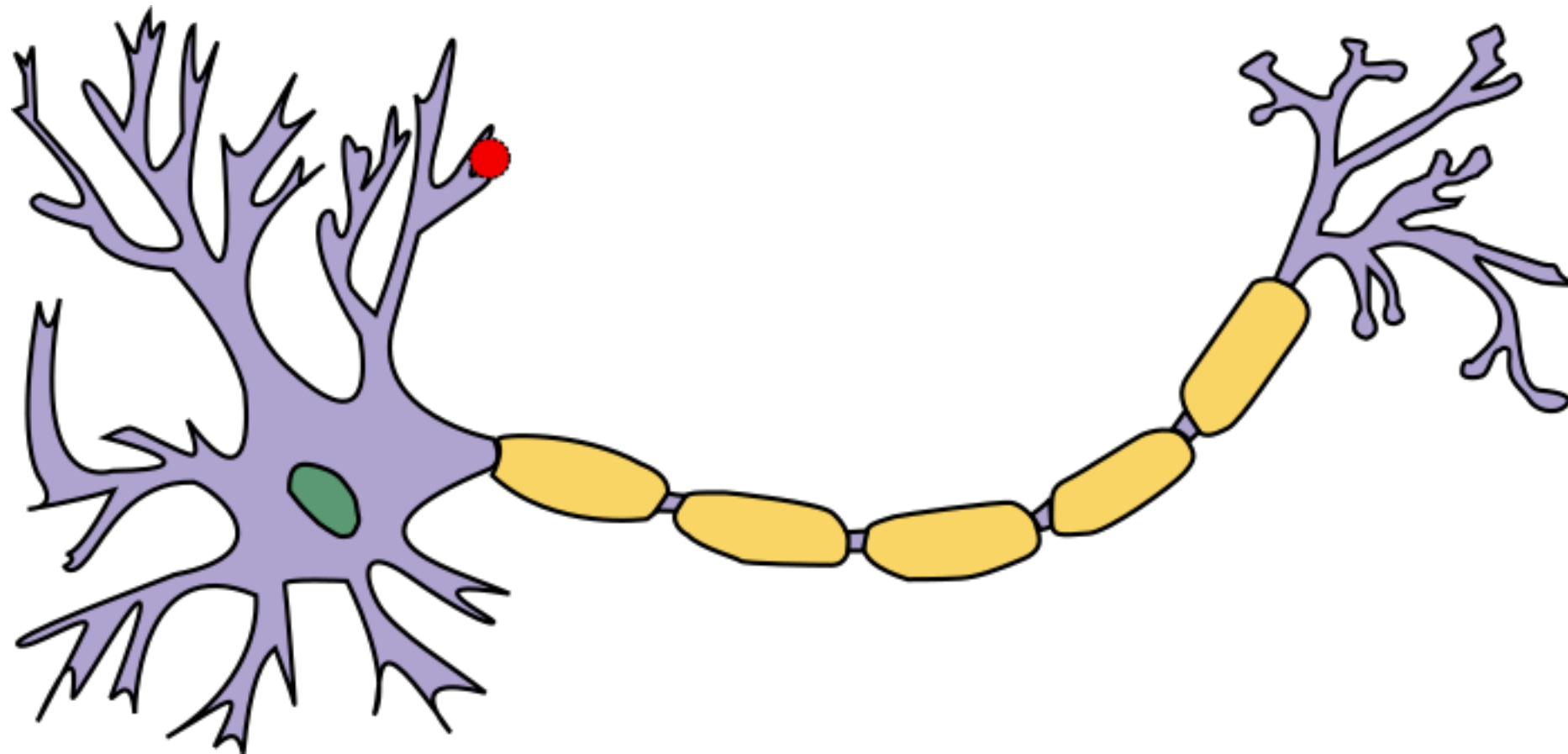
Naturalne sieci neuronowe

Zasada działania neuronu



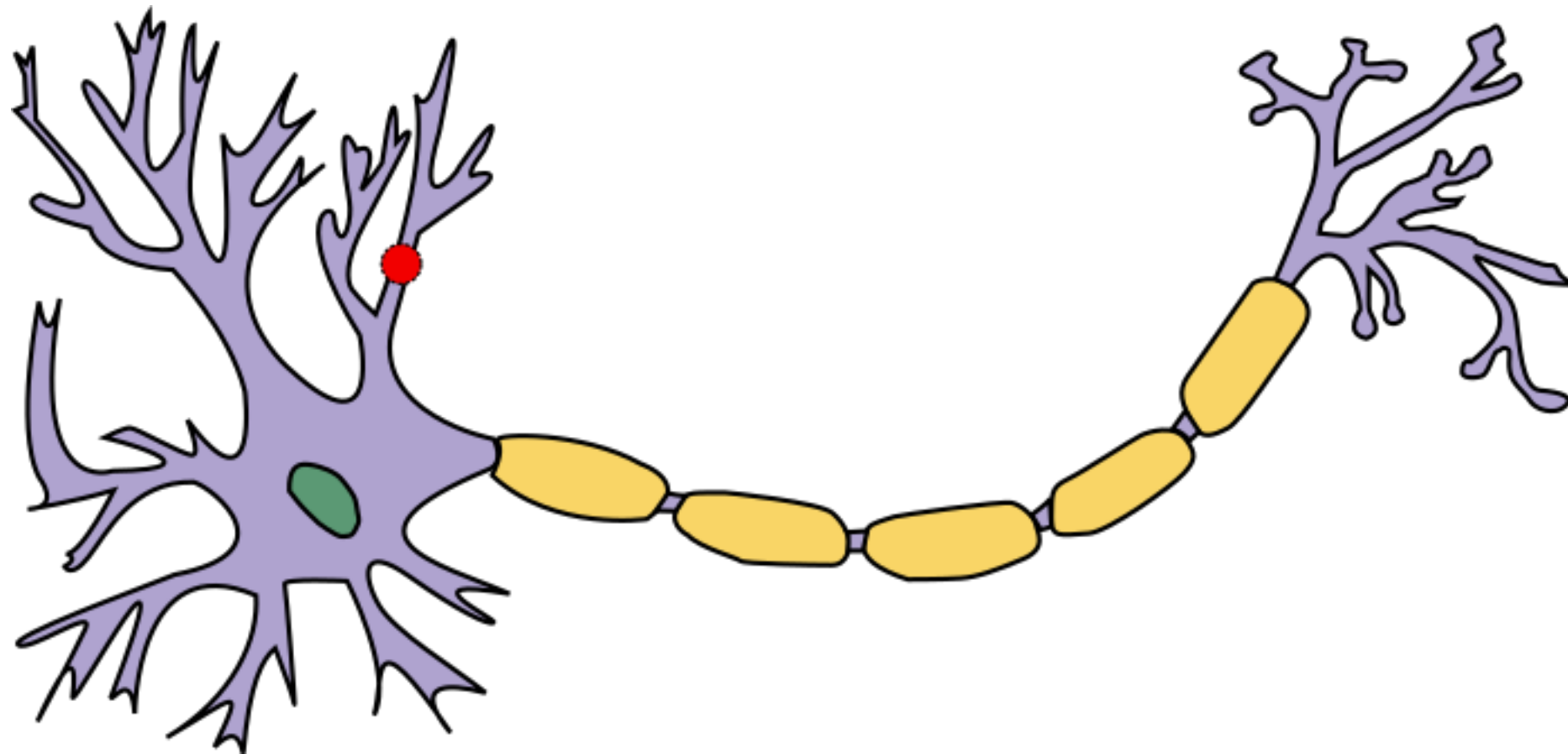
Naturalne sieci neuronowe

Zasada działania neuronu



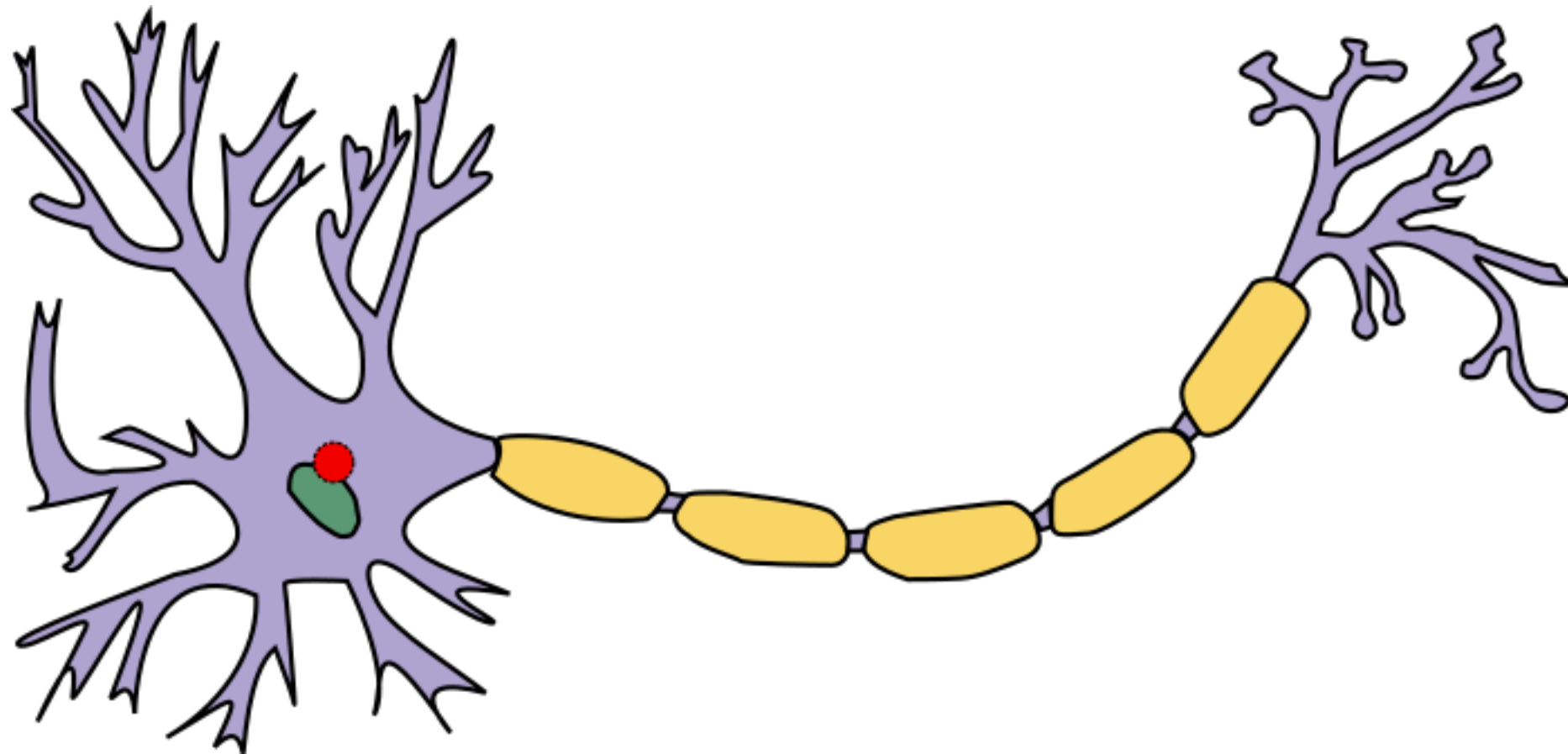
Naturalne sieci neuronowe

Zasada działania neuronu



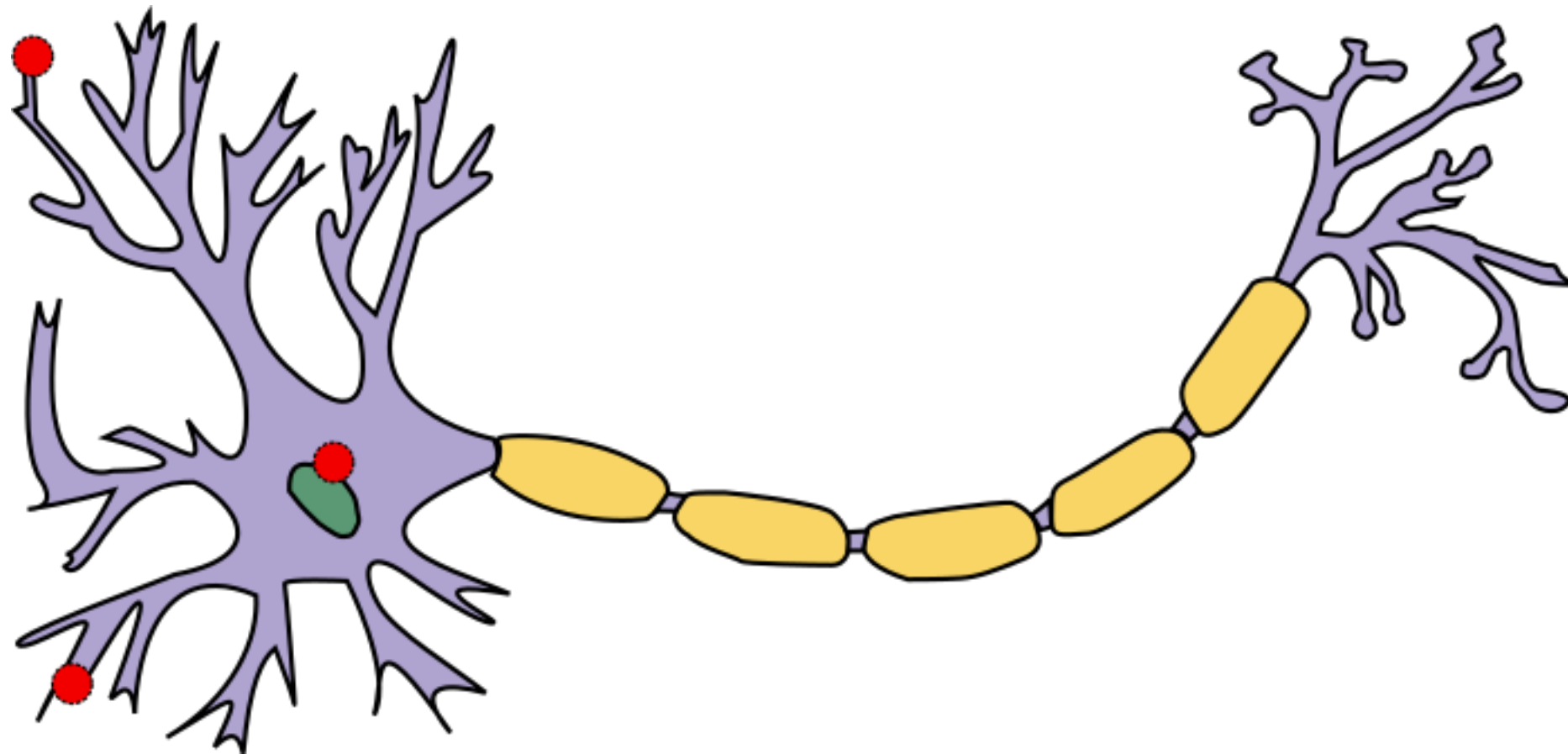
Naturalne sieci neuronowe

Zasada działania neuronu



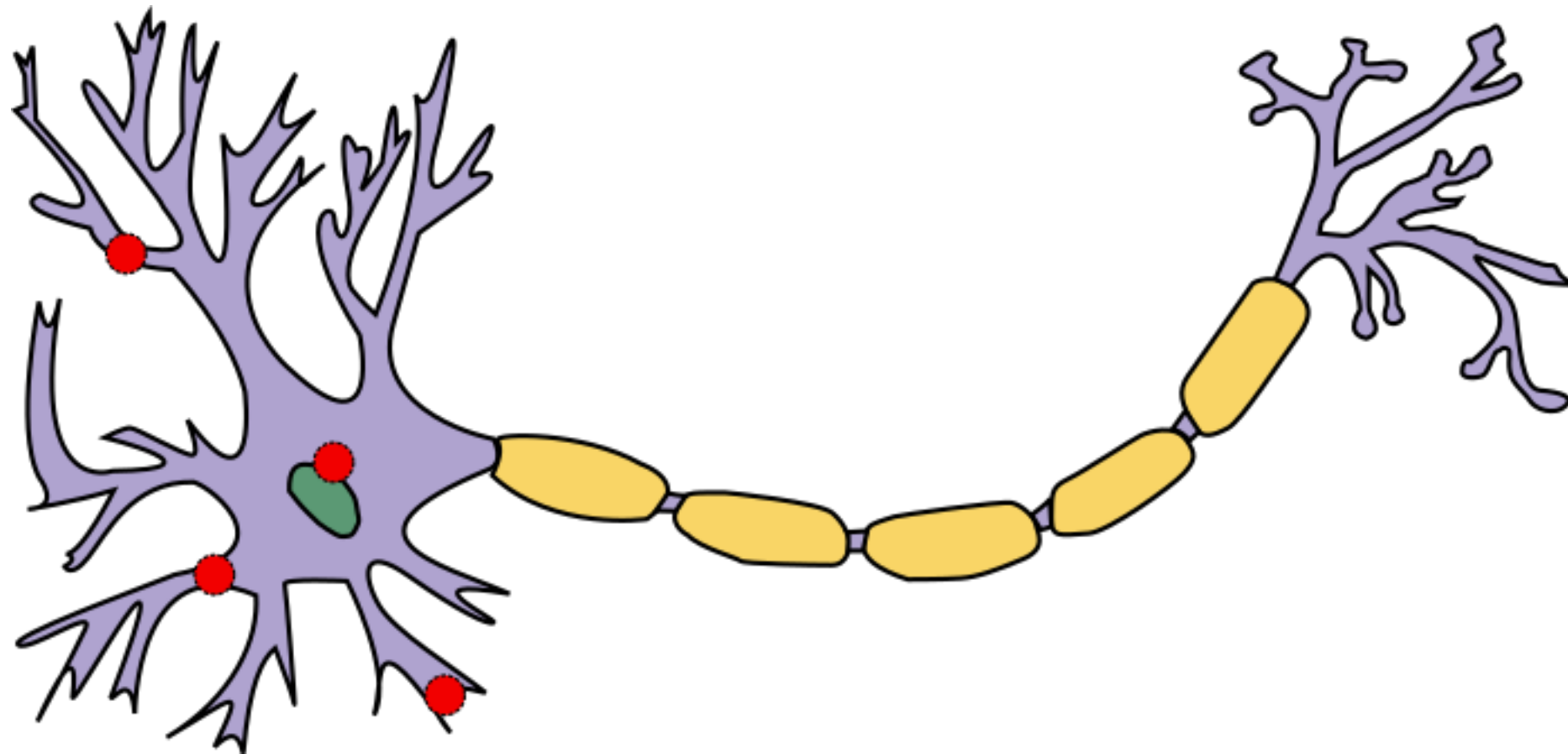
Naturalne sieci neuronowe

Zasada działania neuronu



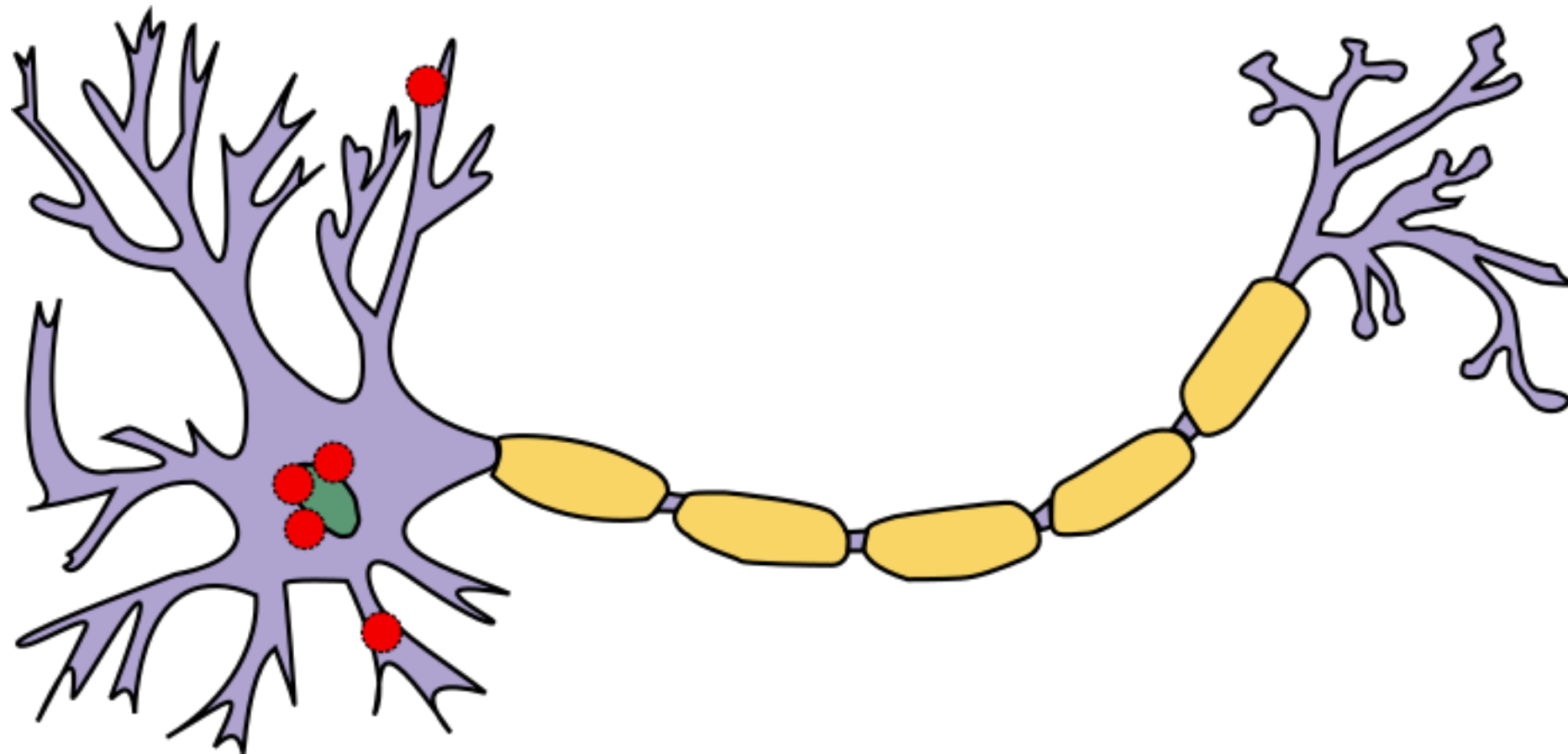
Naturalne sieci neuronowe

Zasada działania neuronu



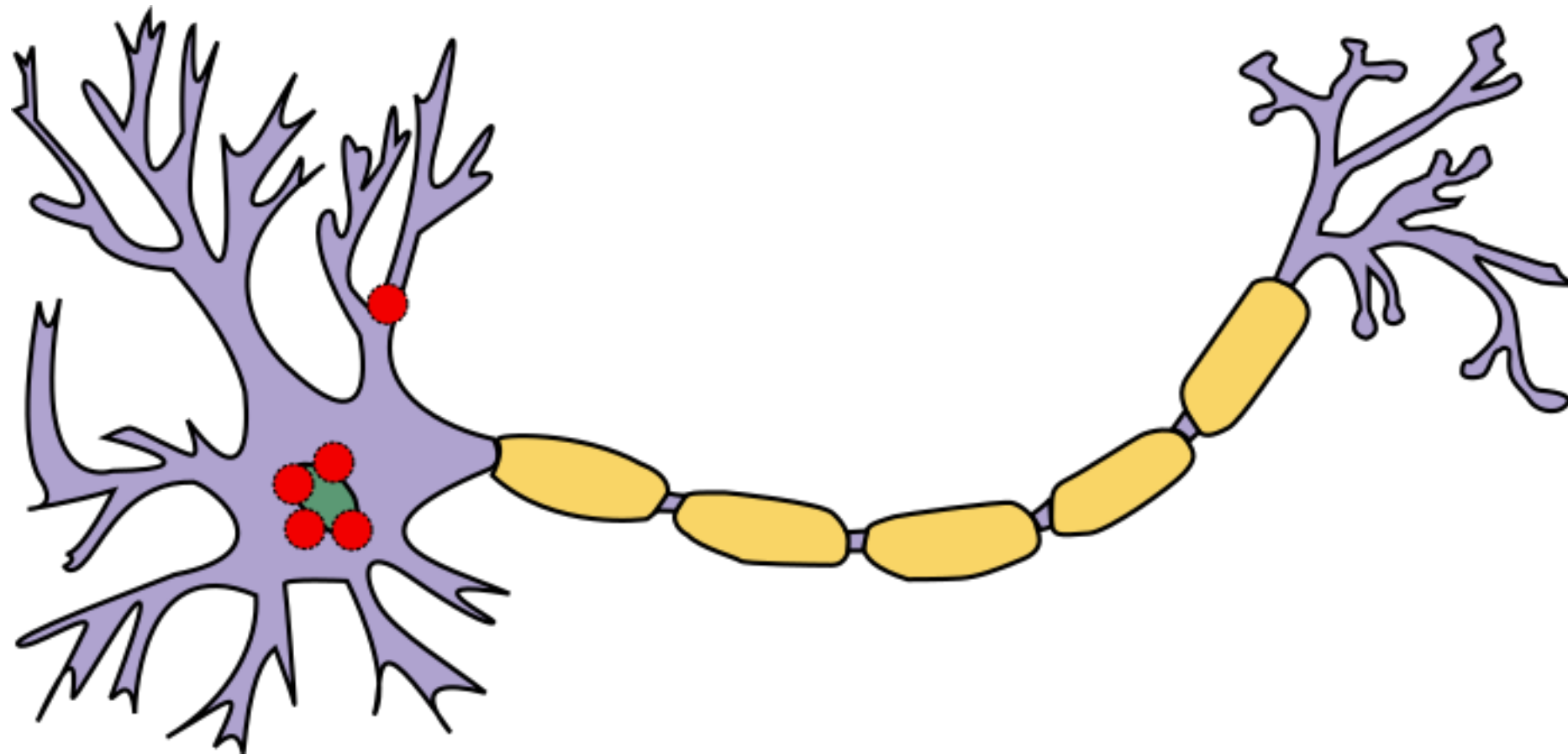
Naturalne sieci neuronowe

Zasada działania neuronu



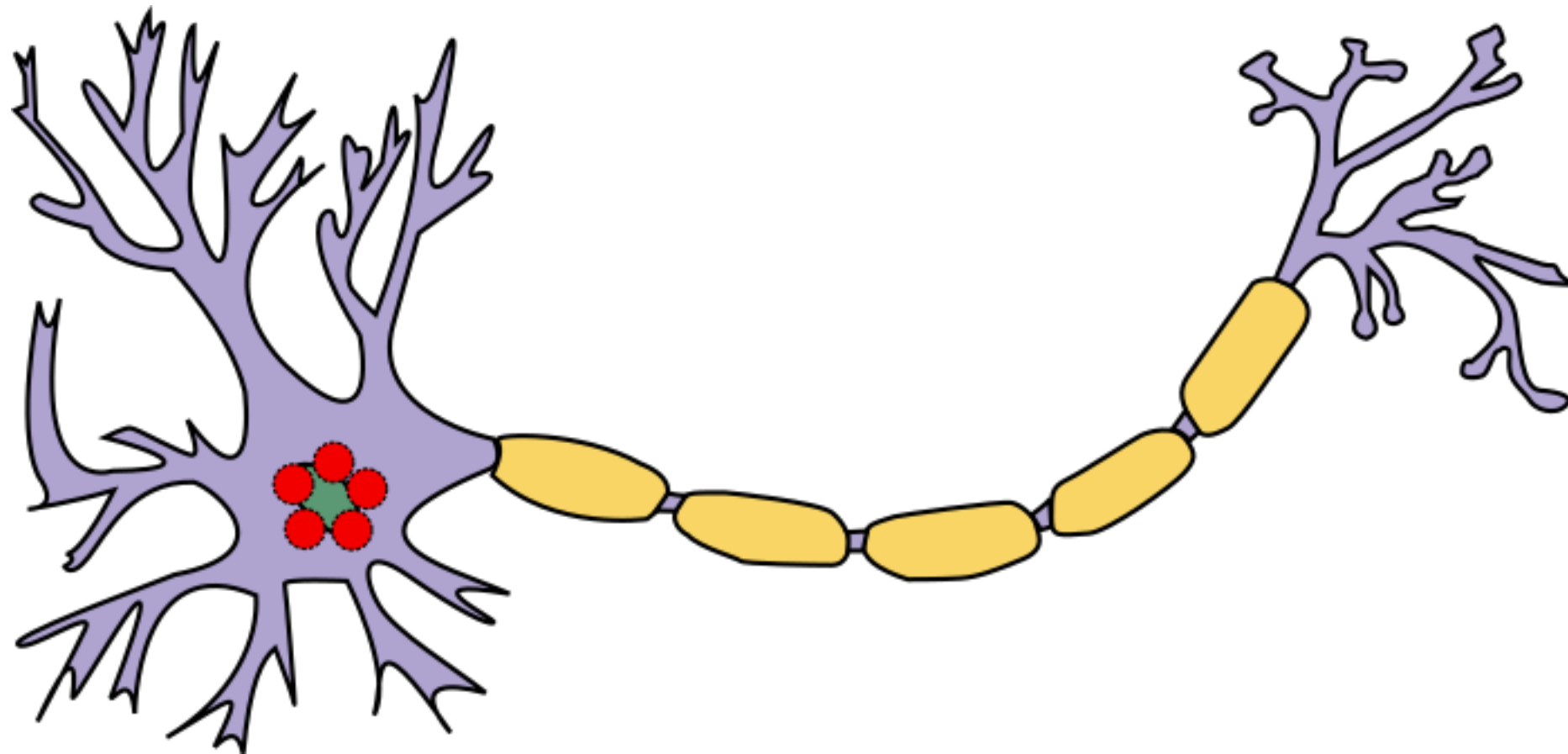
Naturalne sieci neuronowe

Zasada działania neuronu



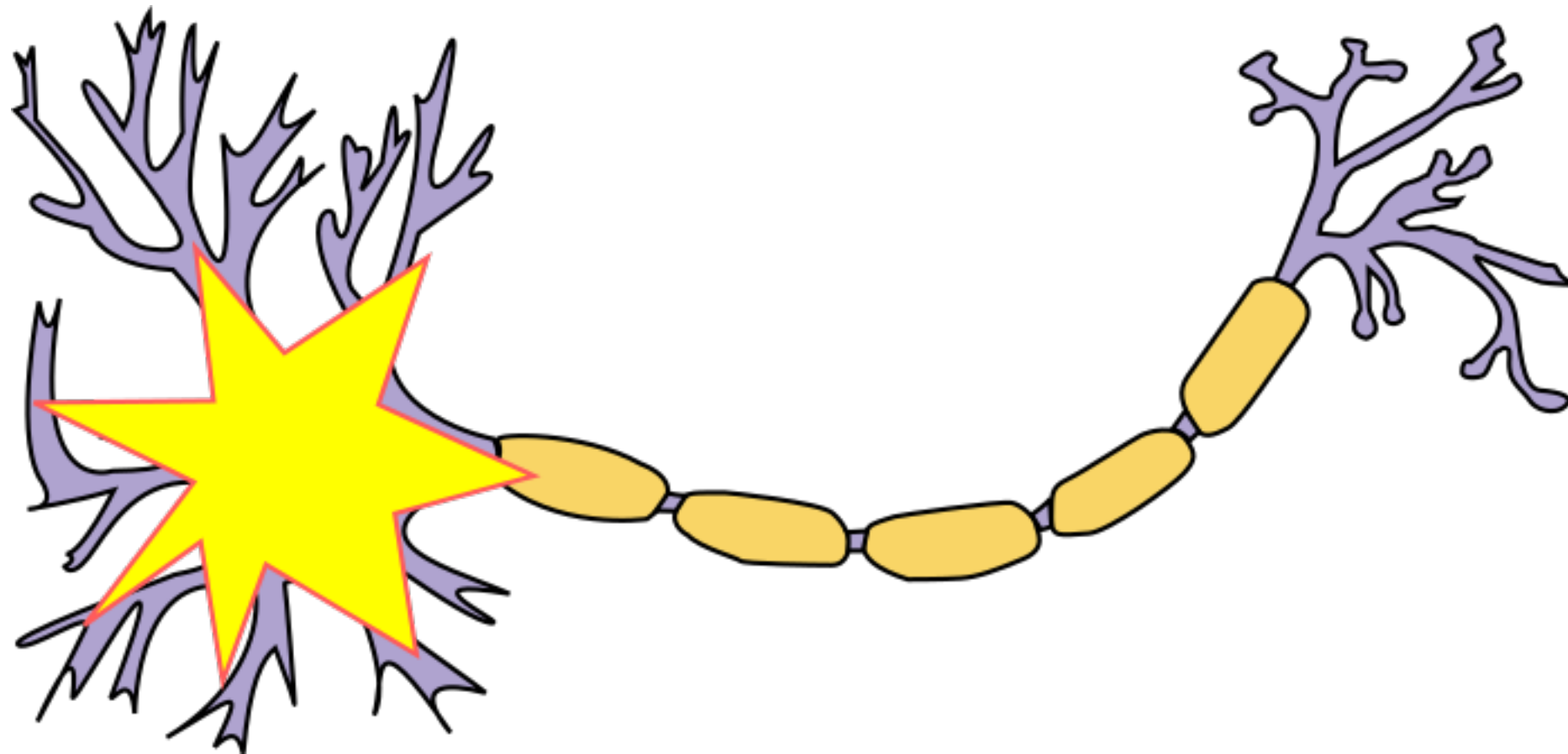
Naturalne sieci neuronowe

Zasada działania neuronu



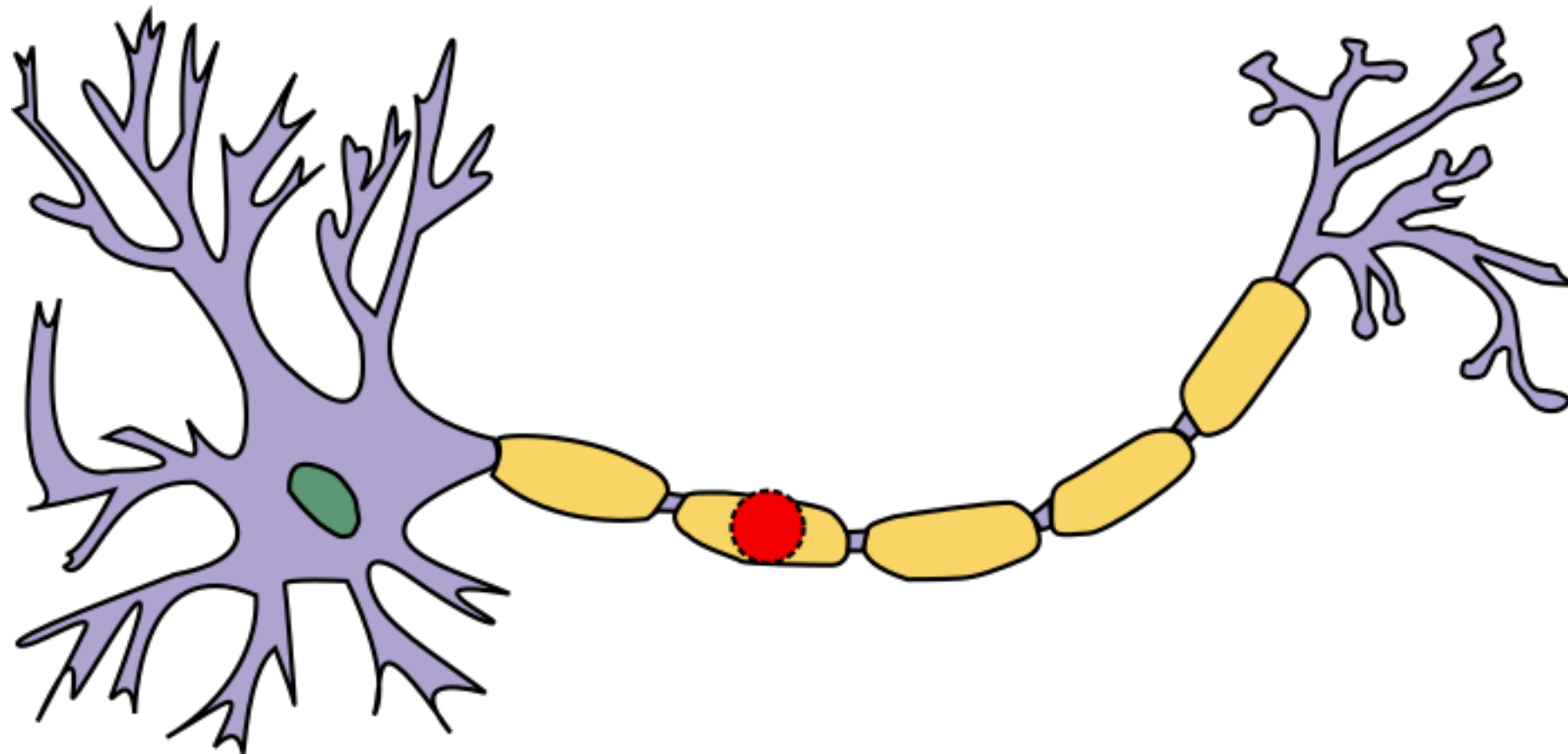
Naturalne sieci neuronowe

Zasada działania neuronu



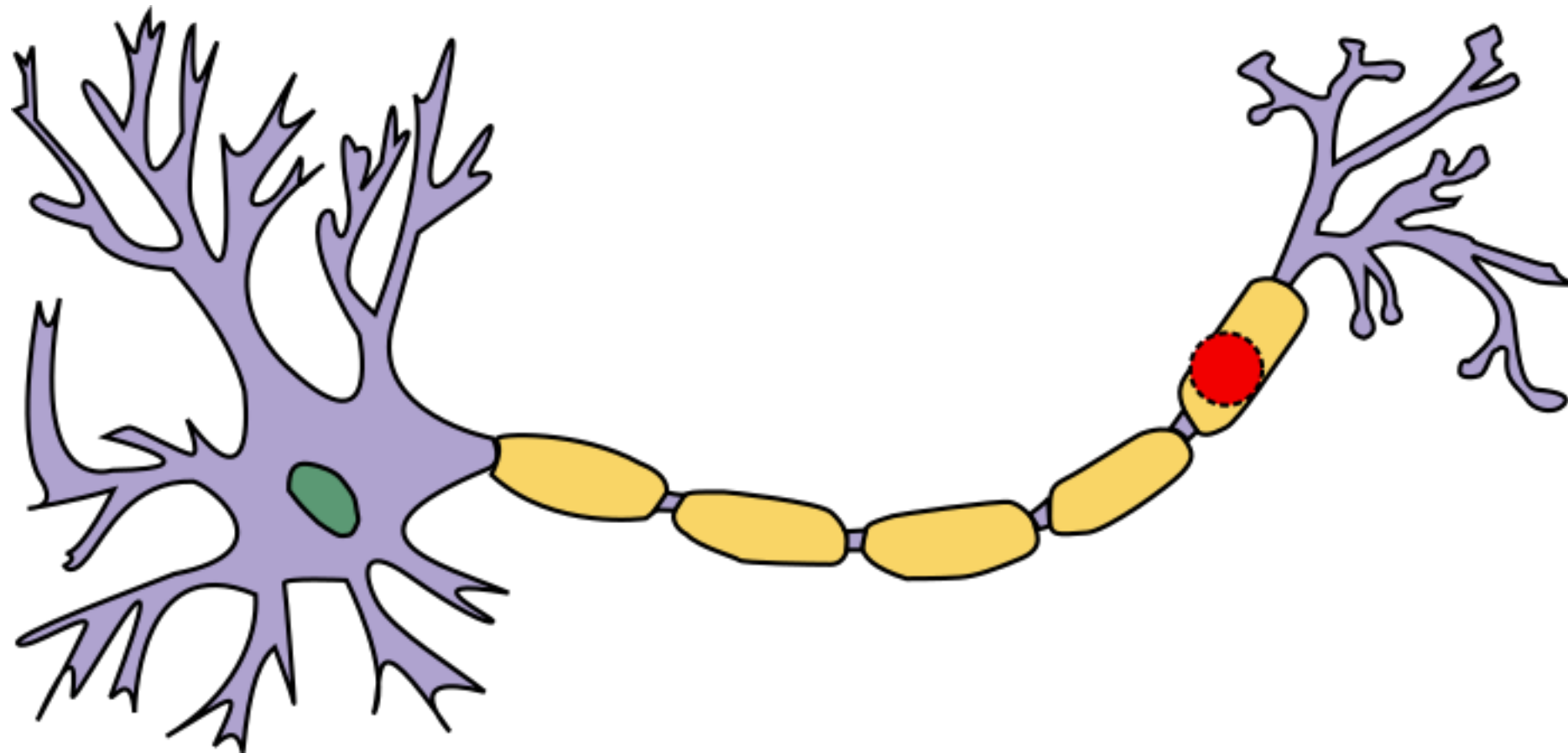
Naturalne sieci neuronowe

Zasada działania neuronu



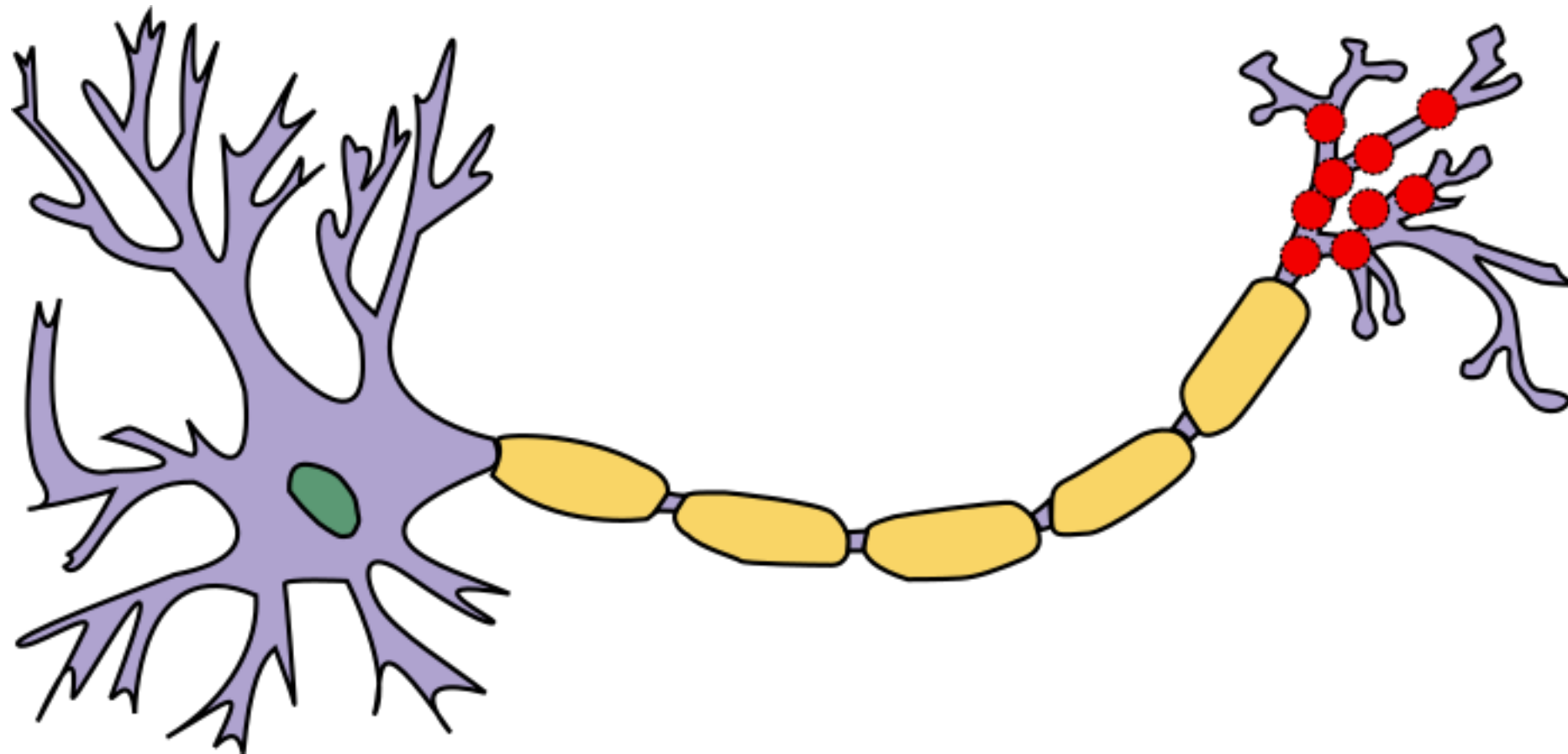
Naturalne sieci neuronowe

Zasada działania neuronu



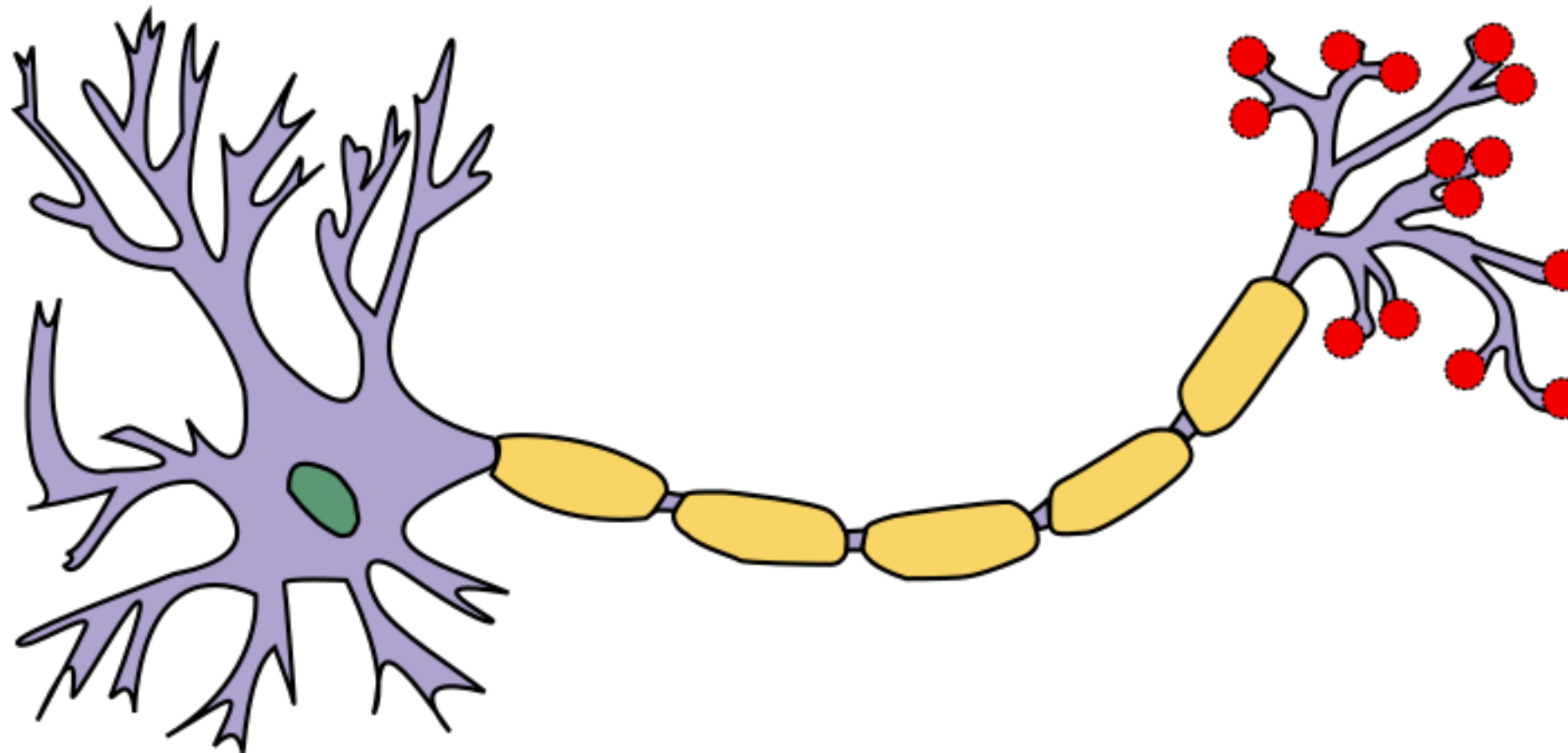
Naturalne sieci neuronowe

Zasada działania neuronu



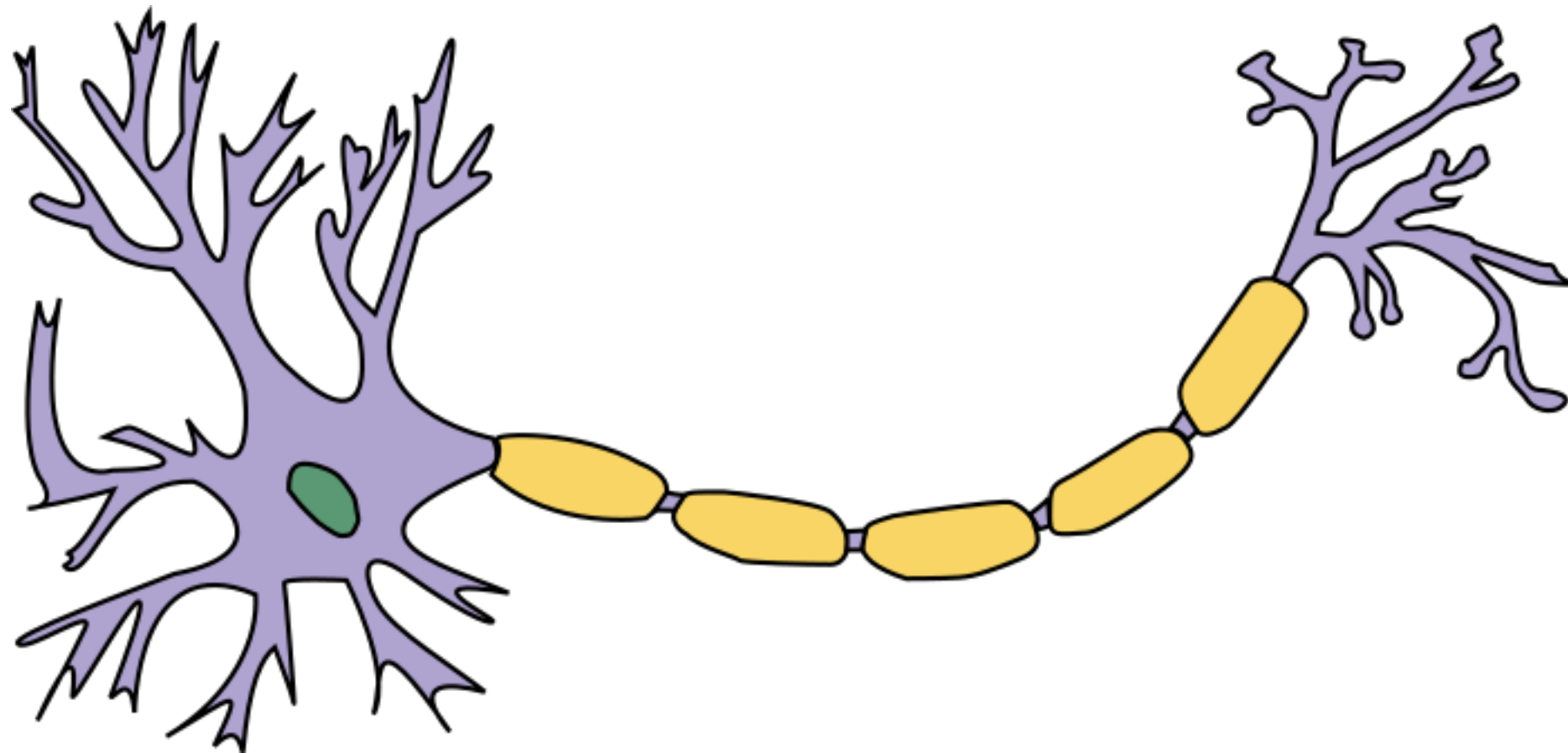
Naturalne sieci neuronowe

Zasada działania neuronu



Naturalne sieci neuronowe

Zasada działania neuronu



Sztuczne sieci neuronowe

Sztuczne sieci neuronowe

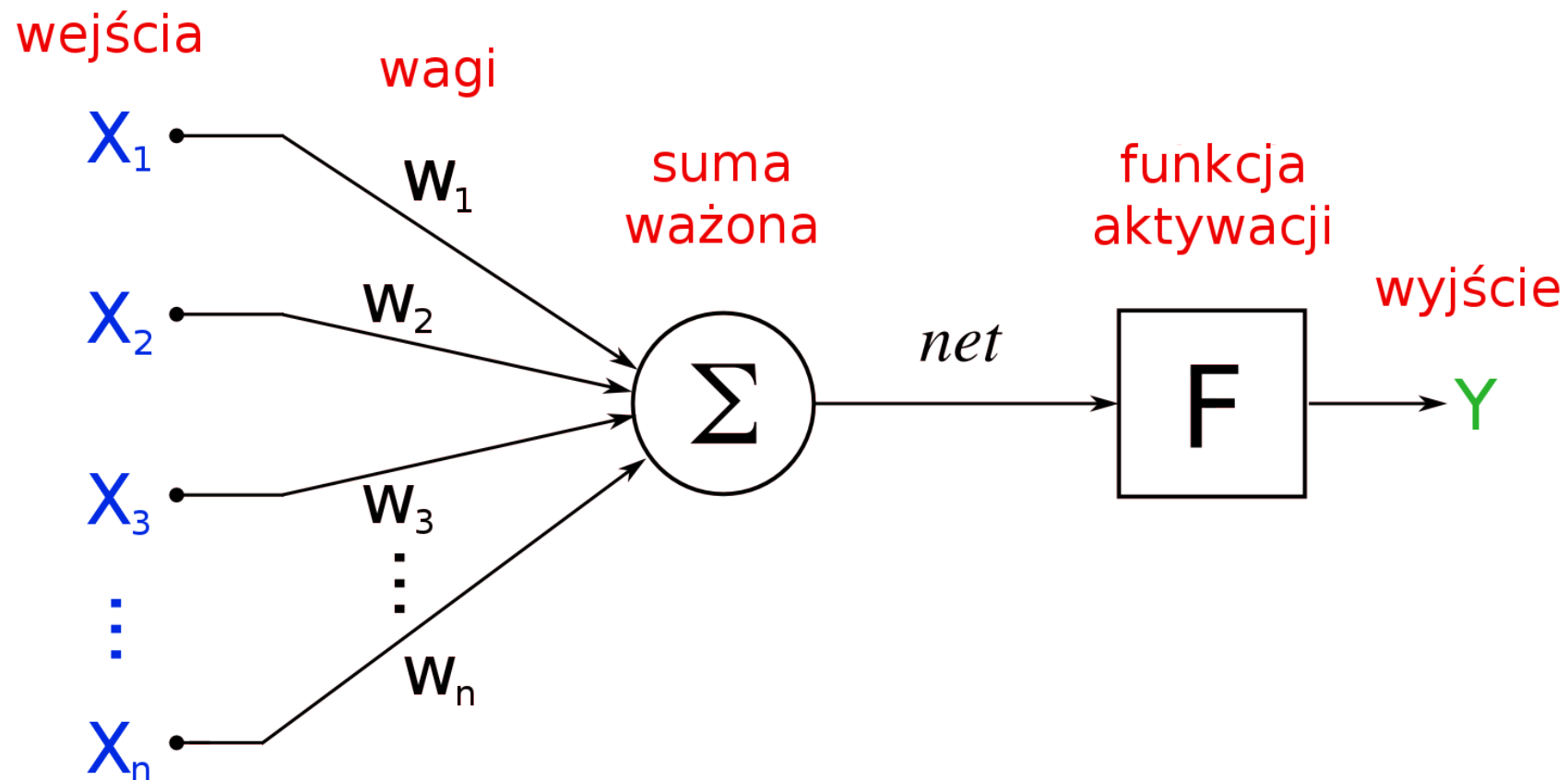
Wprowadzenie – definicja sztucznej sieci neuronowej

Sztuczna sieć neuronowa (ang. *artificial neural network*) to połączenie określonej ilości **sztucznych neuronów**, które implementują pewien *matematyczny model obliczeniowy* w celu przetwarzania informacji i rozwiązywania konkretnych zadań.



Sztuczne sieci neuronowe

Neuron – model sztucznego neuronu

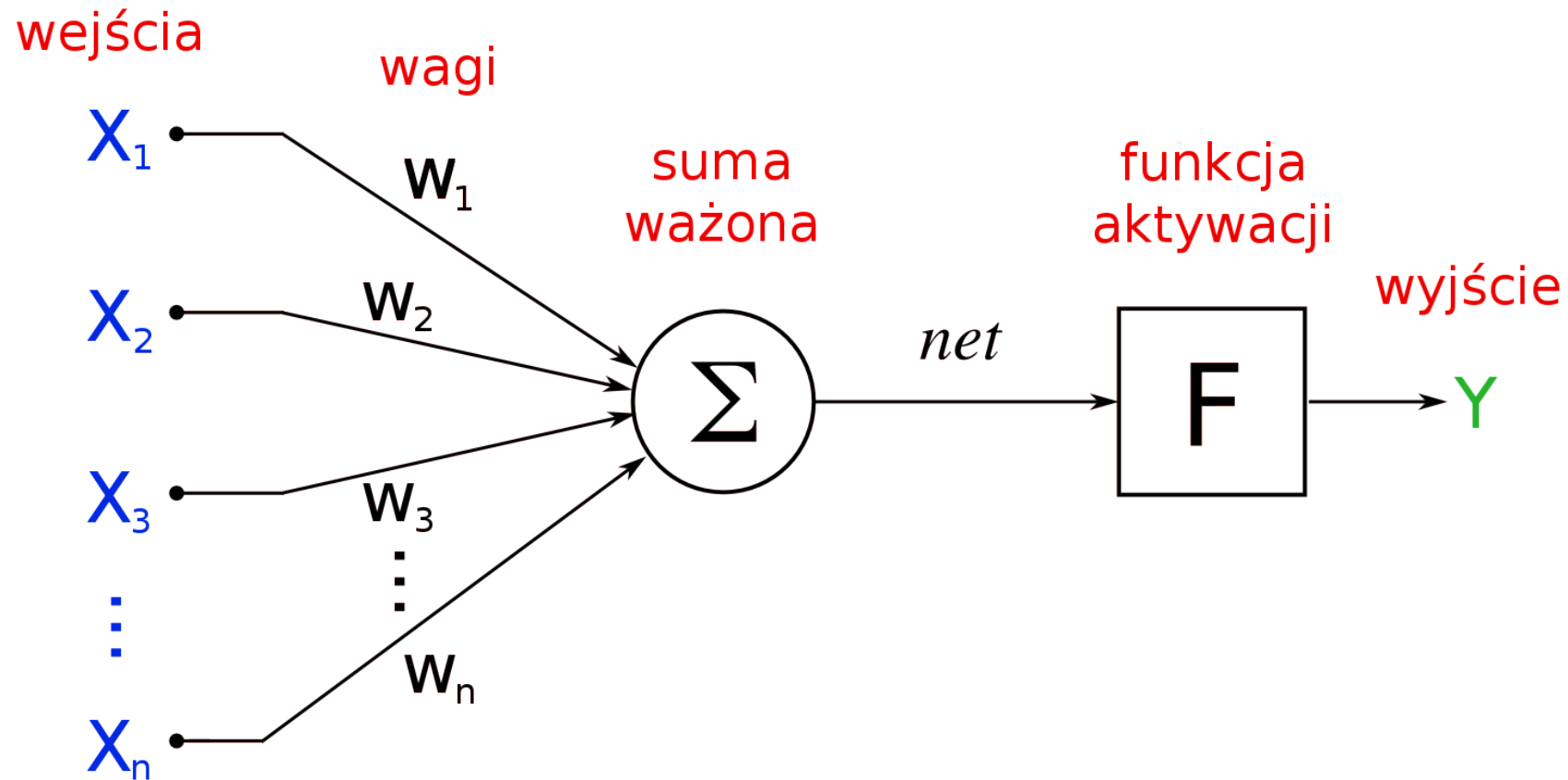


Wejście neuronu to wektor x posiadający n elementów. Jest to odpowiednik dendrytów w biologicznym neuronie.



Sztuczne sieci neuronowe

Neuron – model sztucznego neuronu

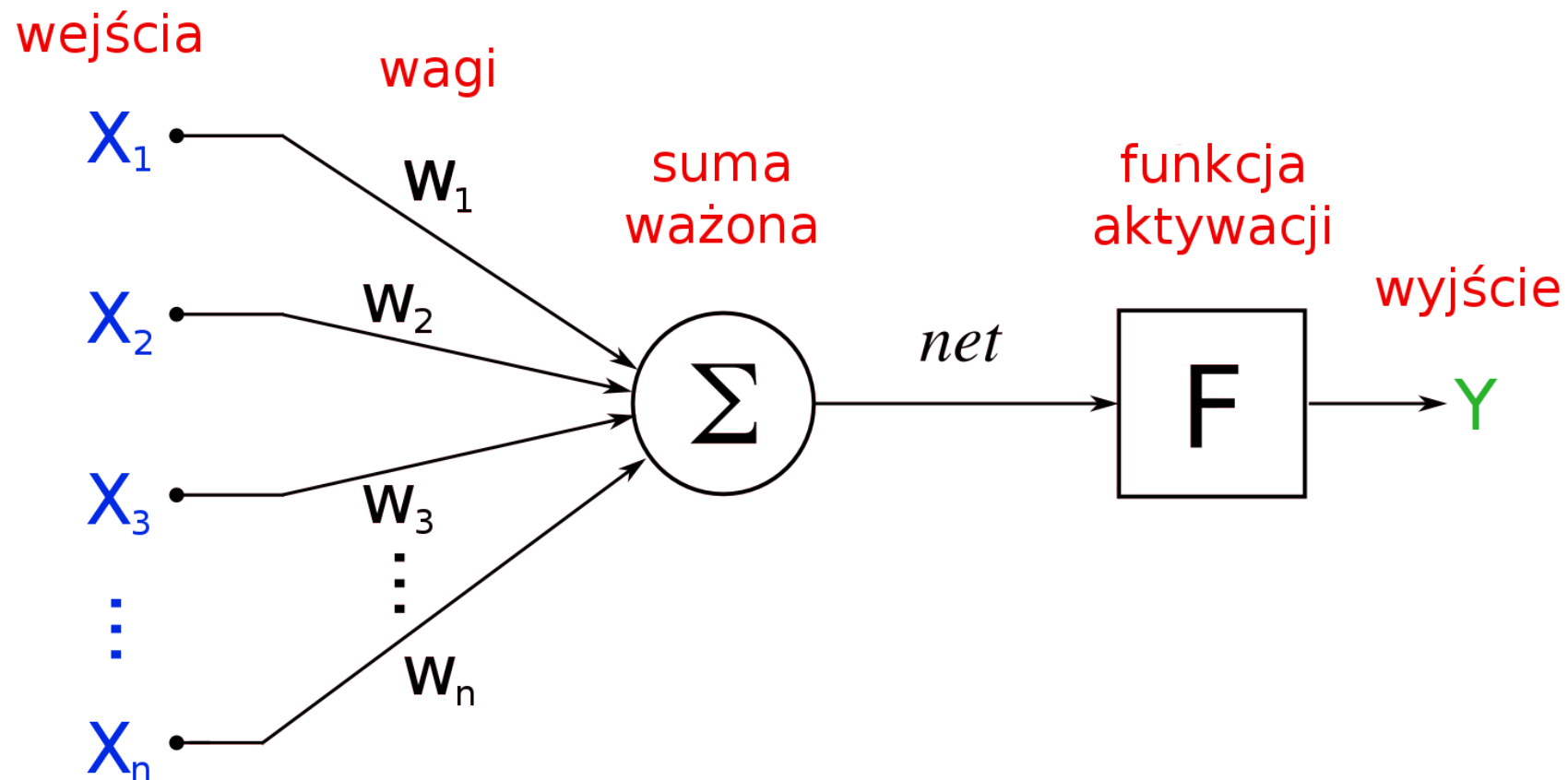


Każde wejście x_i posiada przyporządkowaną wagę w_i ,
 $i = 1, \dots, n$.



Sztuczne sieci neuronowe

Neuron – model sztucznego neuronu

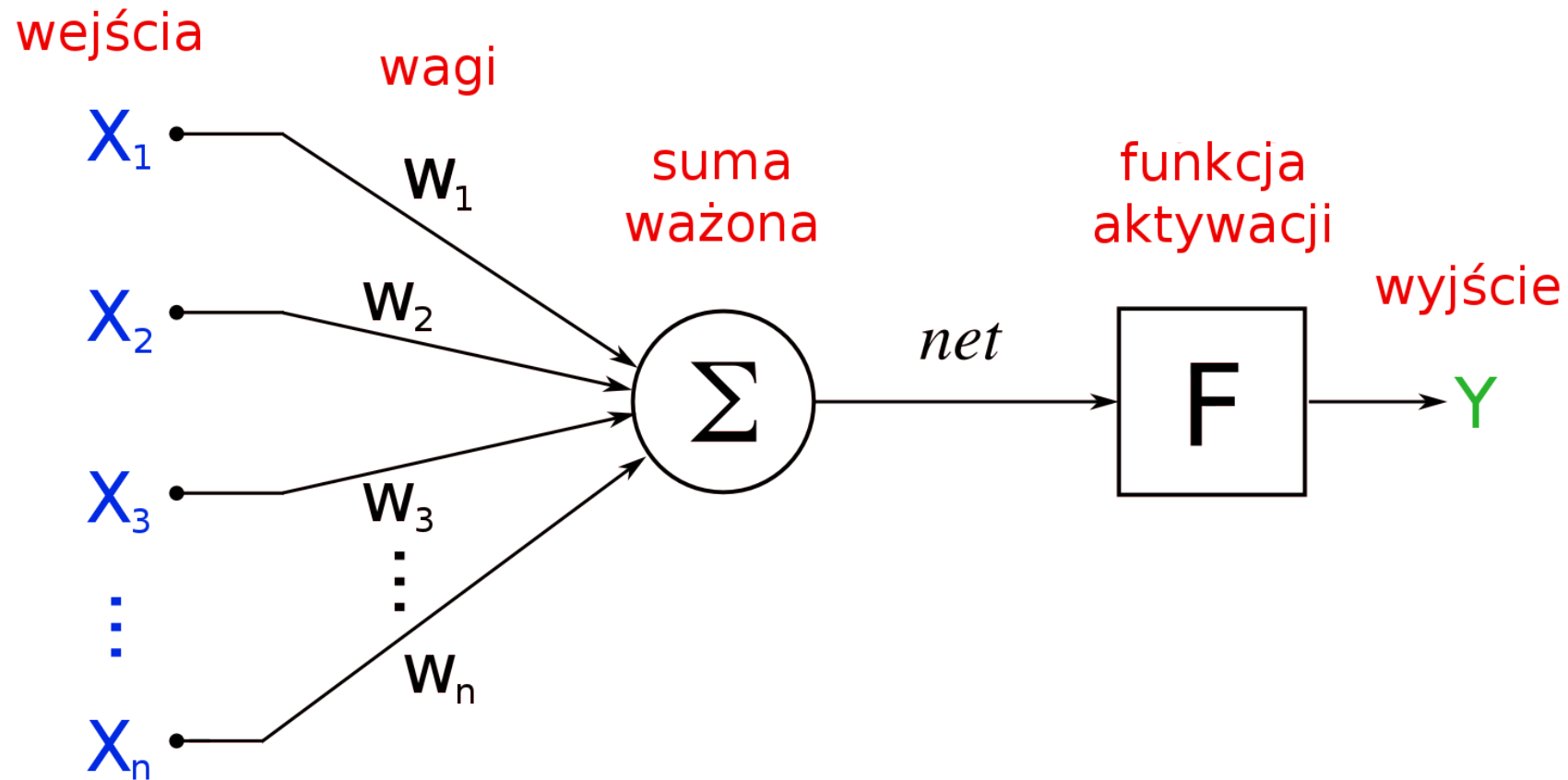


Neuron oblicza swoje **pobudzenie** *net*, czyli *sumę ważoną*.
Jest to iloczyn skalarny wejść x oraz wag w .



Sztuczne sieci neuronowe

Neuron – model sztucznego neuronu

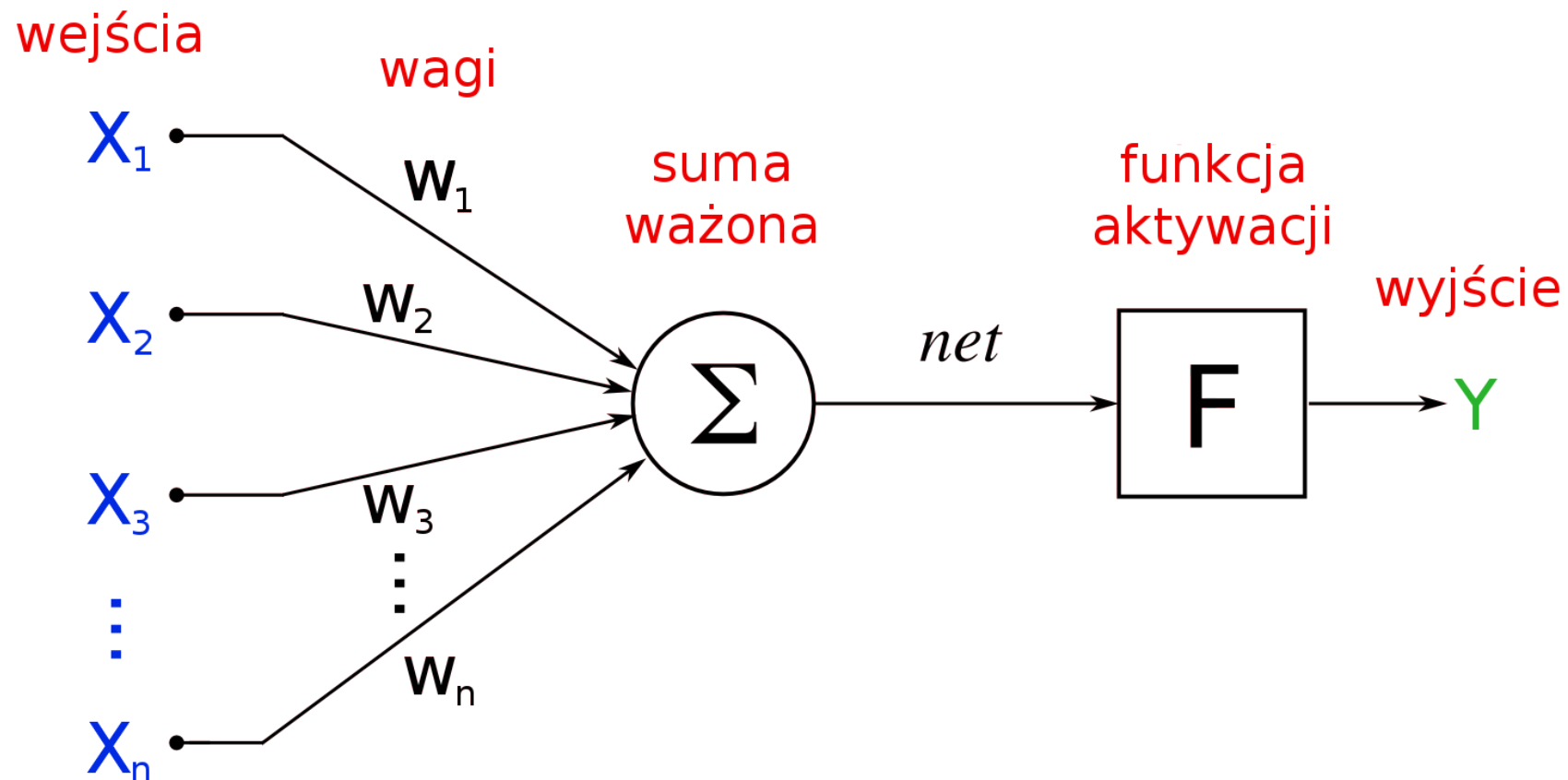


$$net = x_1w_1 + x_2w_2 + \dots + x_nw_n = \sum_{i=1}^n x_iw_i$$



Sztuczne sieci neuronowe

Neuron – model sztucznego neuronu



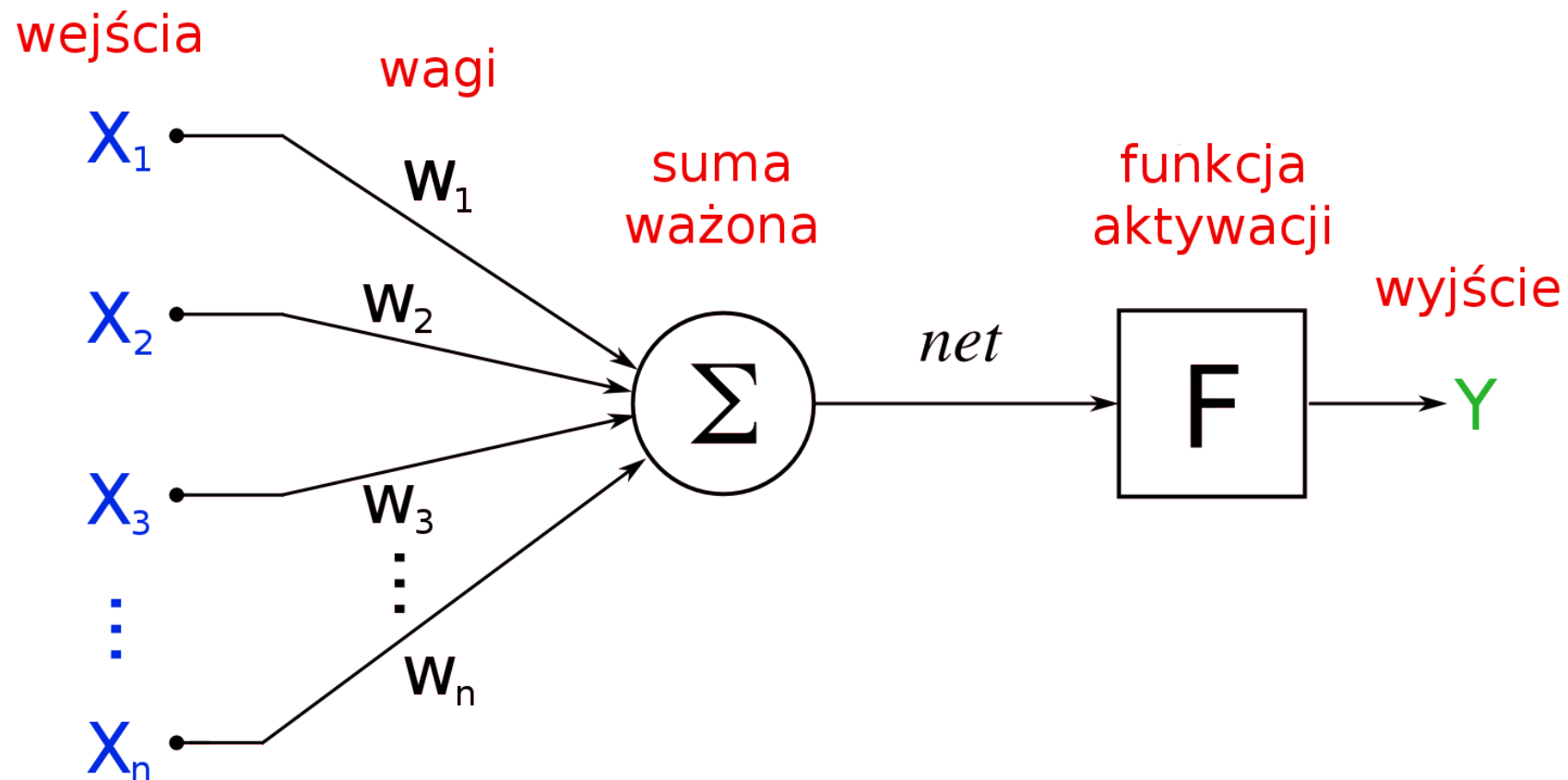
Wartość funkcji aktywacji $F(net)$ to **wyjście** Y z neuronu:

$$Y = F(net) = F\left(\sum_{i=1}^n x_i w_i\right)$$



Sztuczne sieci neuronowe

Neuron – model sztucznego neuronu

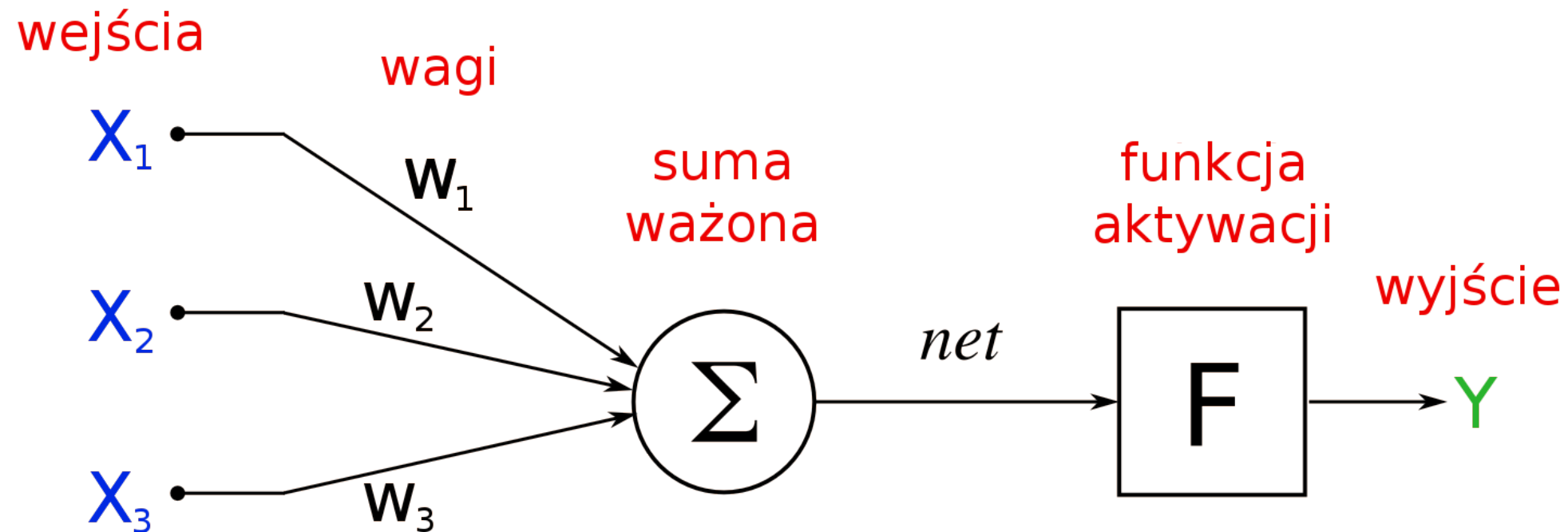


Wartość funkcji aktywacji $F(net)$ to **wyjście** Y z neuronu.
Jest to odpowiednik **aksonu i synapsy** w biologicznym neuronie.



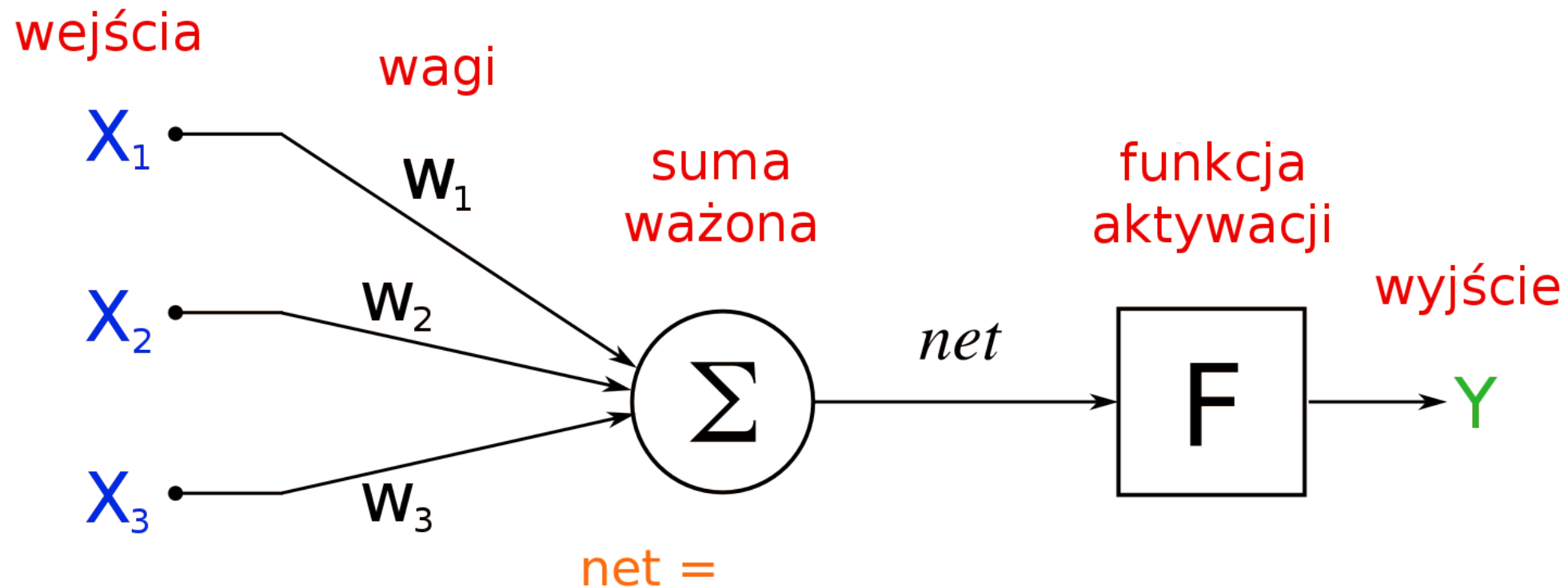
Sztuczne sieci neuronowe

Neuron – praktyczny przykład propagacji sygnału w przód



Sztuczne sieci neuronowe

Neuron – praktyczny przykład propagacji sygnału w przód

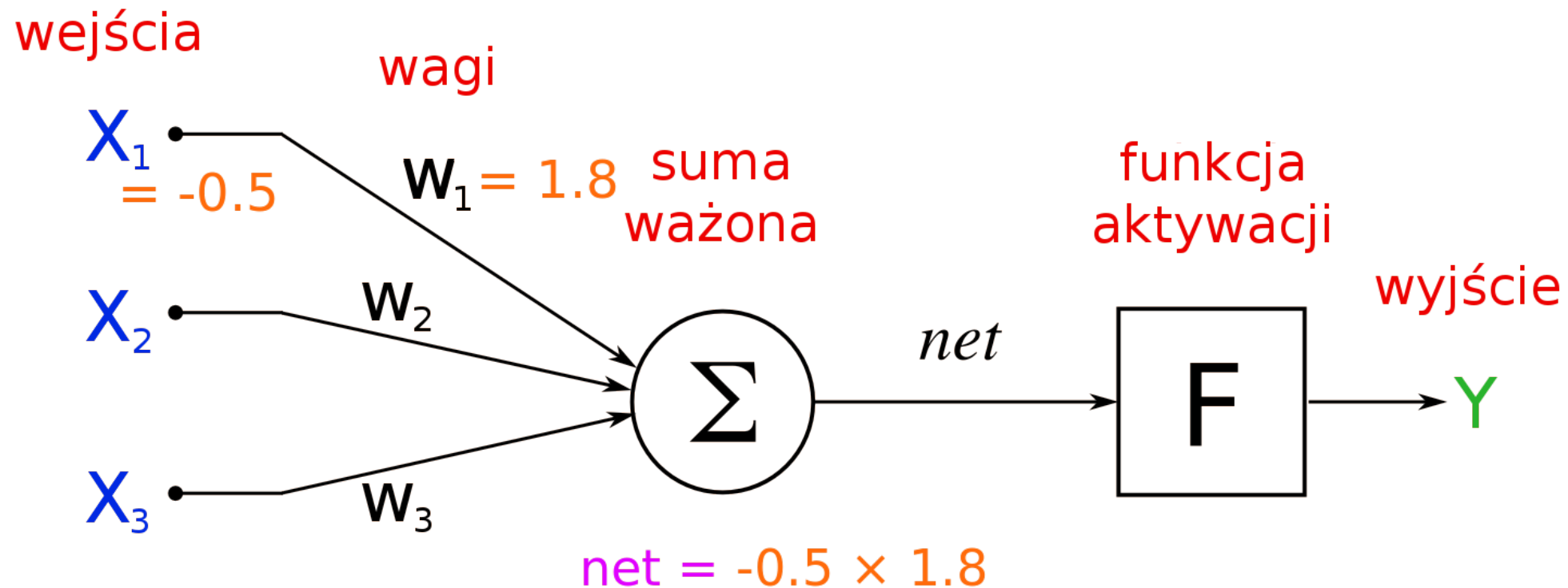


Obliczamy pobudzenie neuronu.



Sztuczne sieci neuronowe

Neuron – praktyczny przykład propagacji sygnału w przód

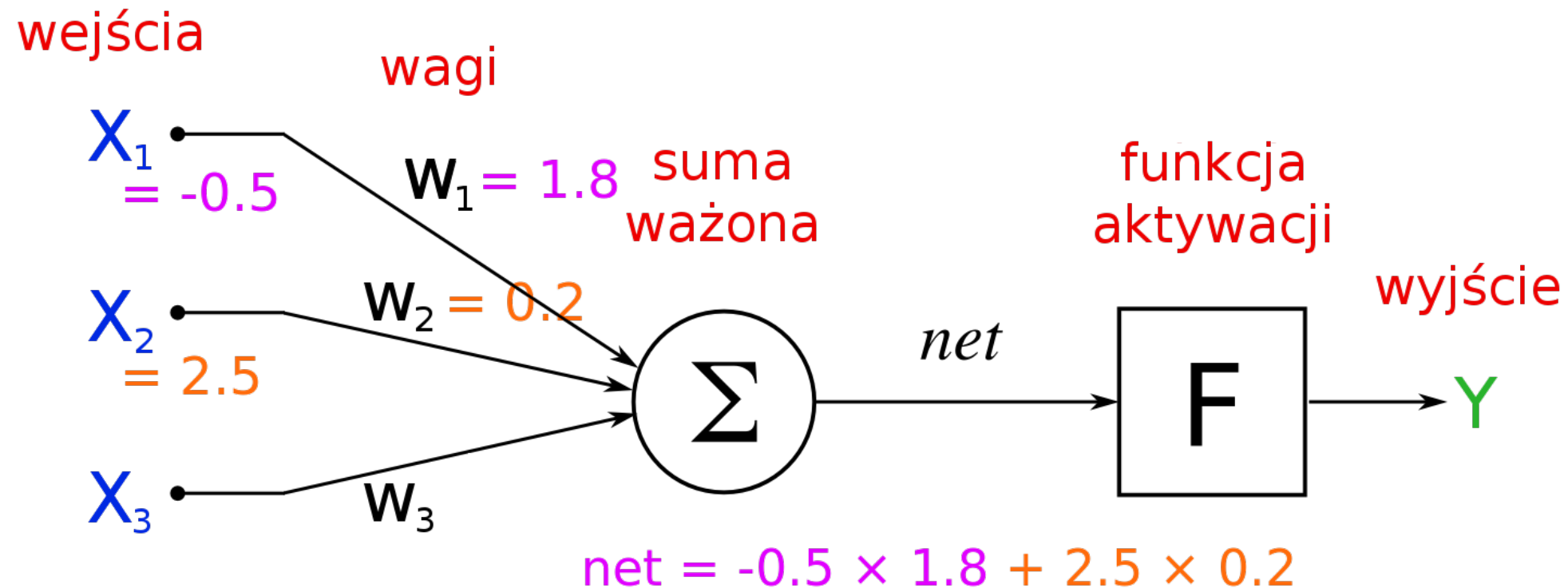


Obliczamy pobudzenie neuronu.



Sztuczne sieci neuronowe

Neuron – praktyczny przykład propagacji sygnału w przód

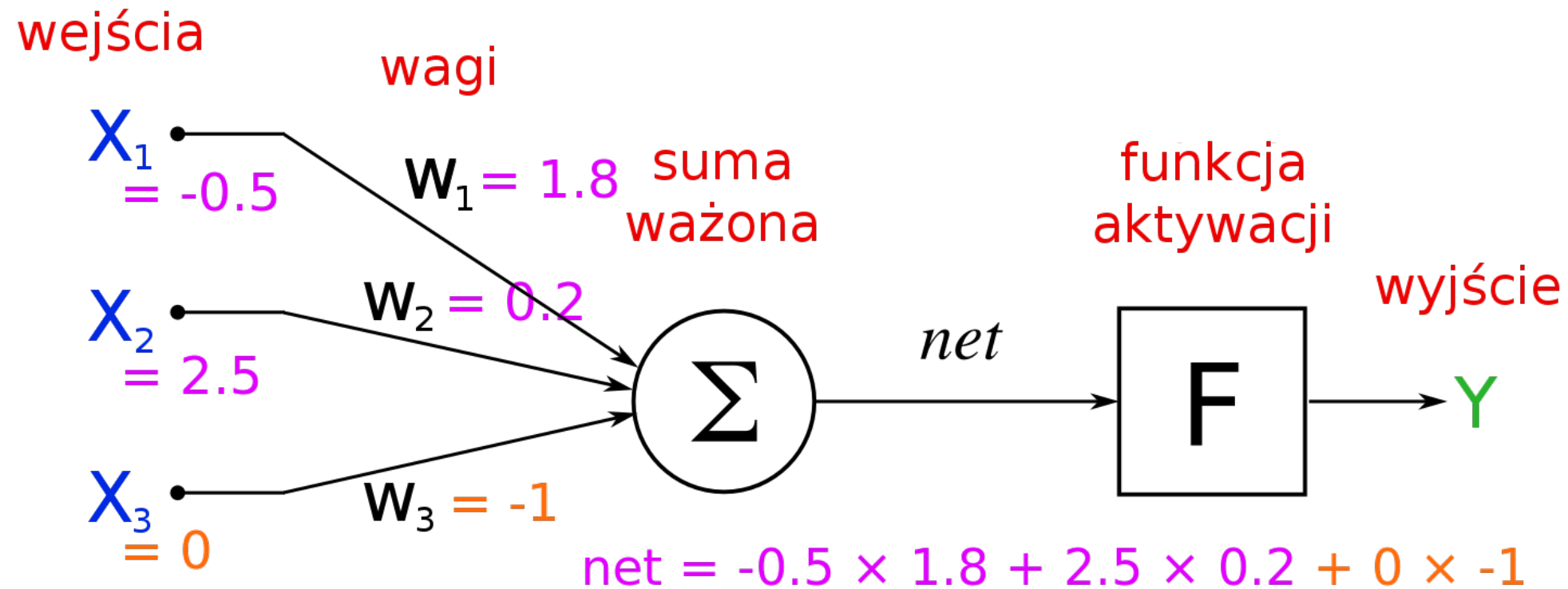


Obliczamy pobudzenie neuronu.



Sztuczne sieci neuronowe

Neuron – praktyczny przykład propagacji sygnału w przód

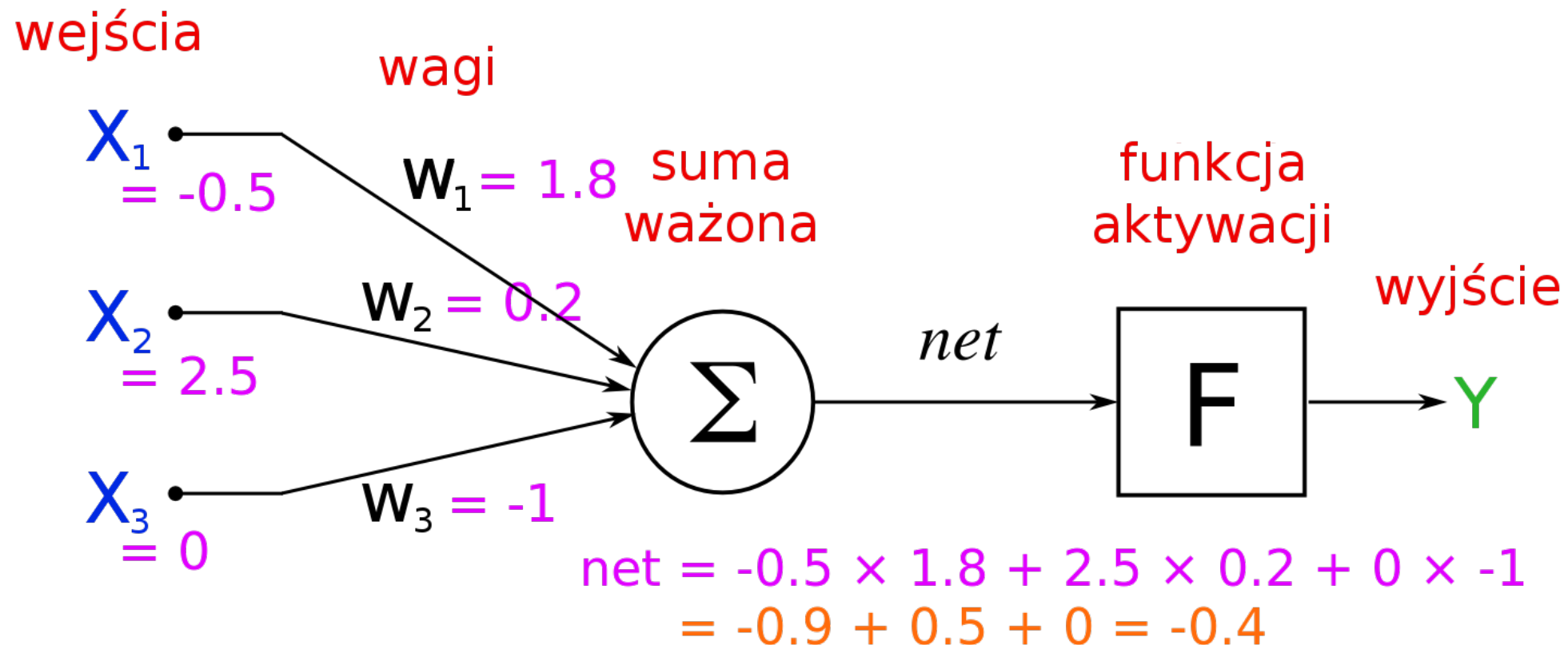


Obliczamy pobudzenie neuronu.



Sztuczne sieci neuronowe

Neuron – praktyczny przykład propagacji sygnału w przód

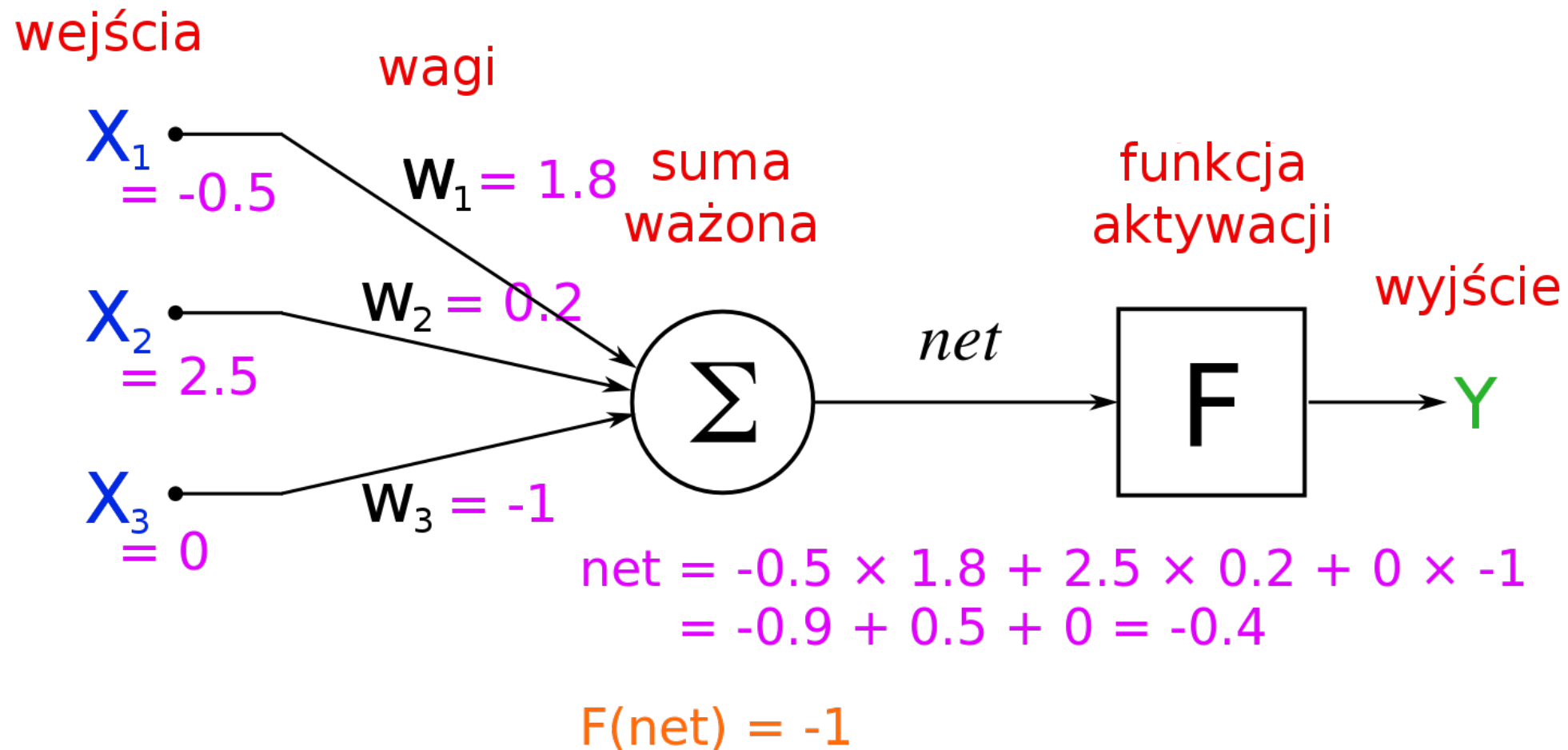


Obliczamy pobudzenie neuronu.



Sztuczne sieci neuronowe

Neuron – praktyczny przykład propagacji sygnału w przód



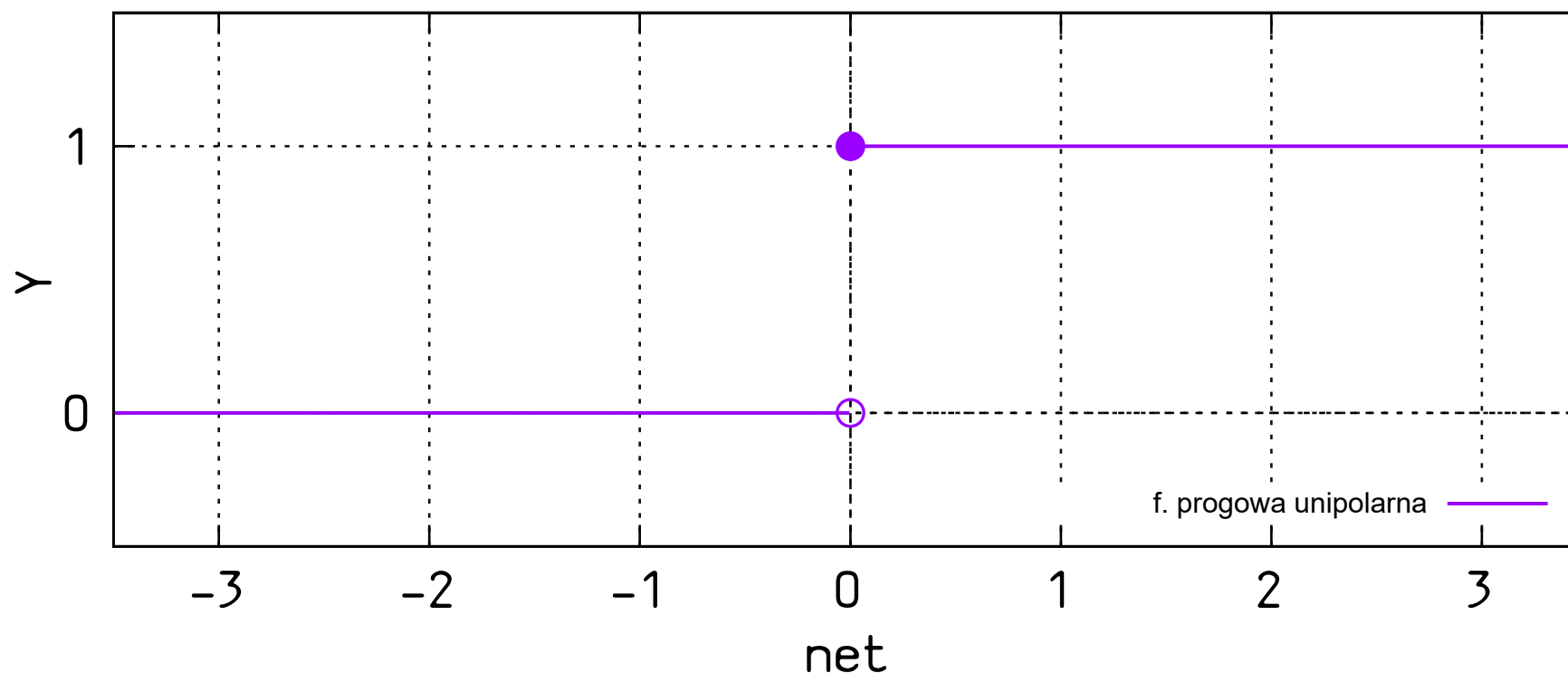
Obliczamy wyjście neuronu. Jako F przyjmujemy funkcję *signum* (wartość -1 dla ujemnych argumentów, 0 dla zera i 1 dla dodatnich).



Sztuczne sieci neuronowe

Funkcje aktywacji – funkcja progowa

Funkcja aktywacji w sztucznych sieciach neuronowych jest odpowiednikiem biologicznego progu aktywacji neuronu.



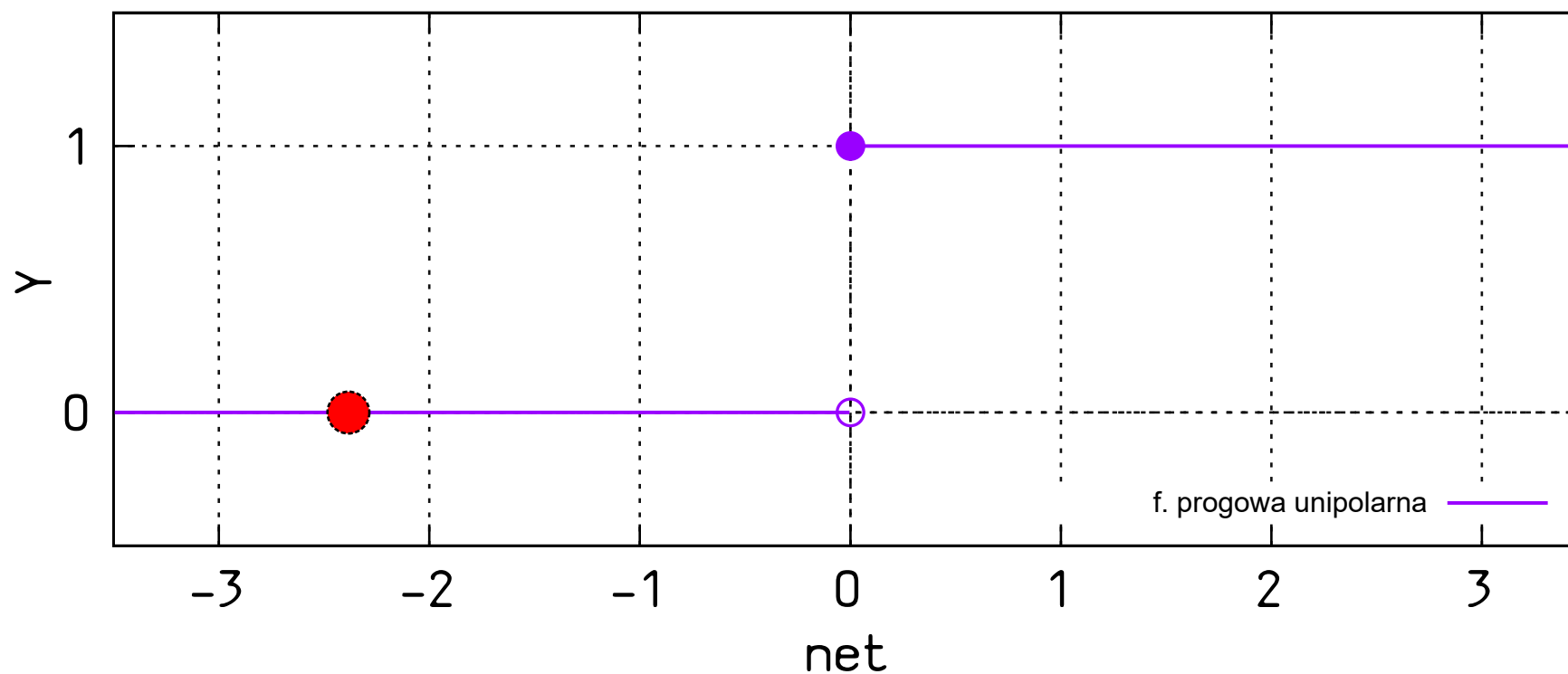
$$F(net) = \begin{cases} 1, & \text{gdy } net \geq 0, \\ 0, & \text{gdy } net < 0. \end{cases}$$



Sztuczne sieci neuronowe

Funkcje aktywacji – funkcja progowa

Funkcja aktywacji w sztucznych sieciach neuronowych jest odpowiednikiem biologicznego progu aktywacji neuronu.



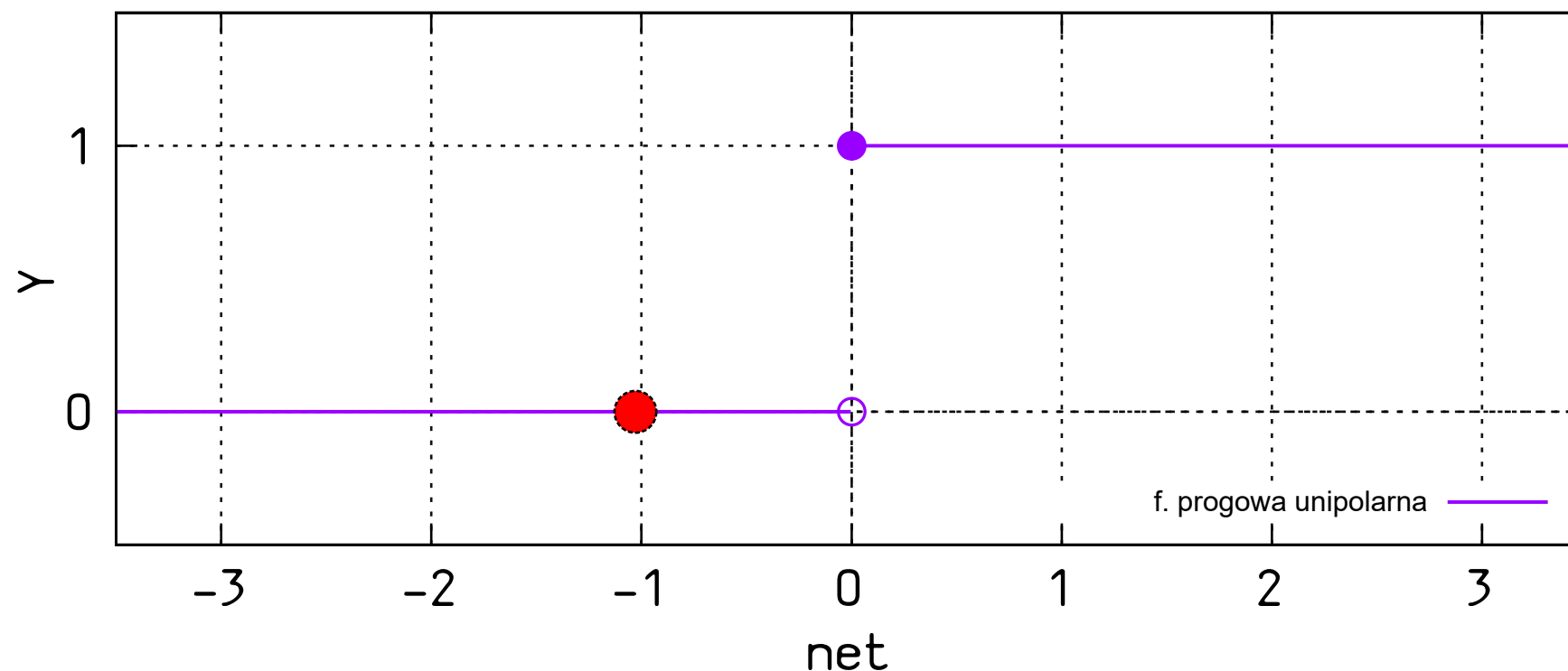
$$F(net) = \begin{cases} 1, & \text{gdy } net \geq 0, \\ 0, & \text{gdy } net < 0. \end{cases}$$



Sztuczne sieci neuronowe

Funkcje aktywacji – funkcja progowa

Funkcja aktywacji w sztucznych sieciach neuronowych jest odpowiednikiem biologicznego progu aktywacji neuronu.



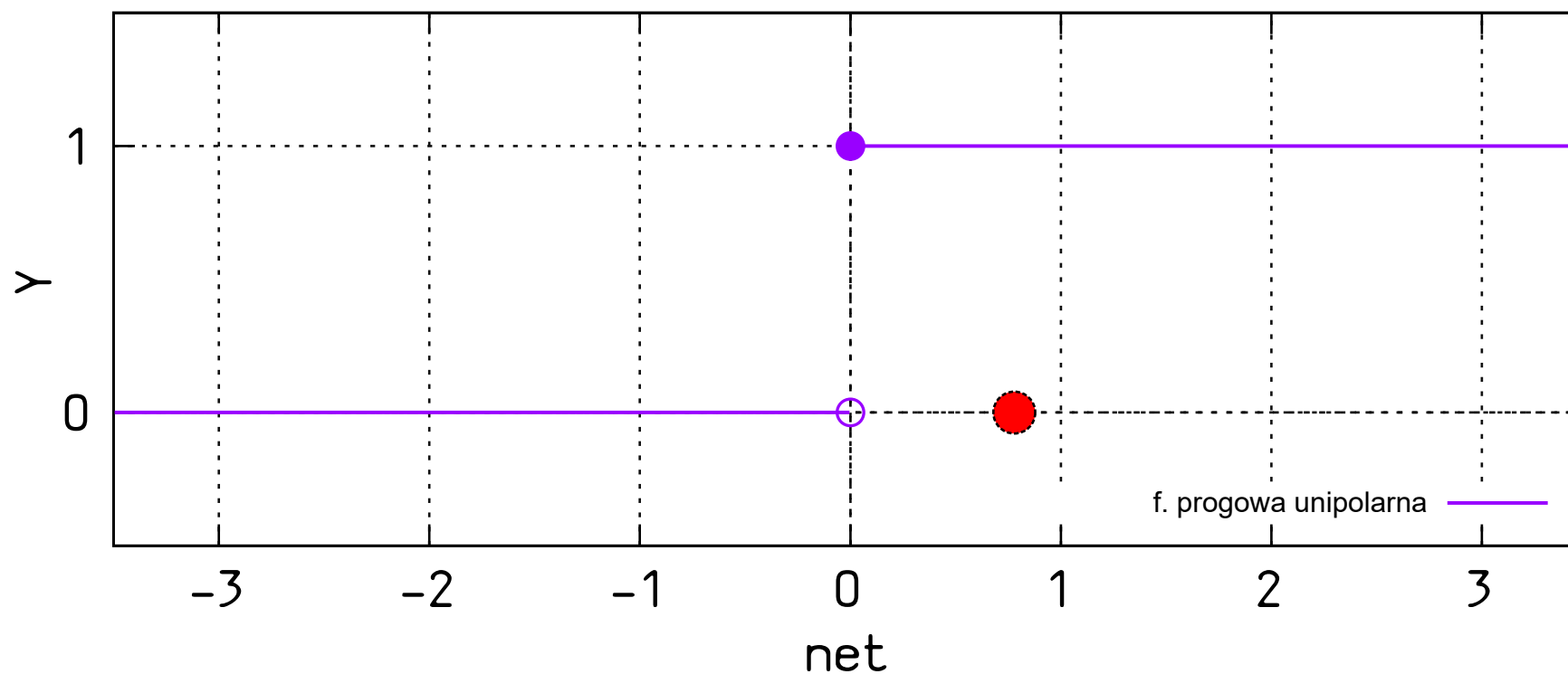
$$F(net) = \begin{cases} 1, & \text{gdy } net \geq 0, \\ 0, & \text{gdy } net < 0. \end{cases}$$



Sztuczne sieci neuronowe

Funkcje aktywacji – funkcja progowa

Funkcja aktywacji w sztucznych sieciach neuronowych jest odpowiednikiem biologicznego progu aktywacji neuronu.



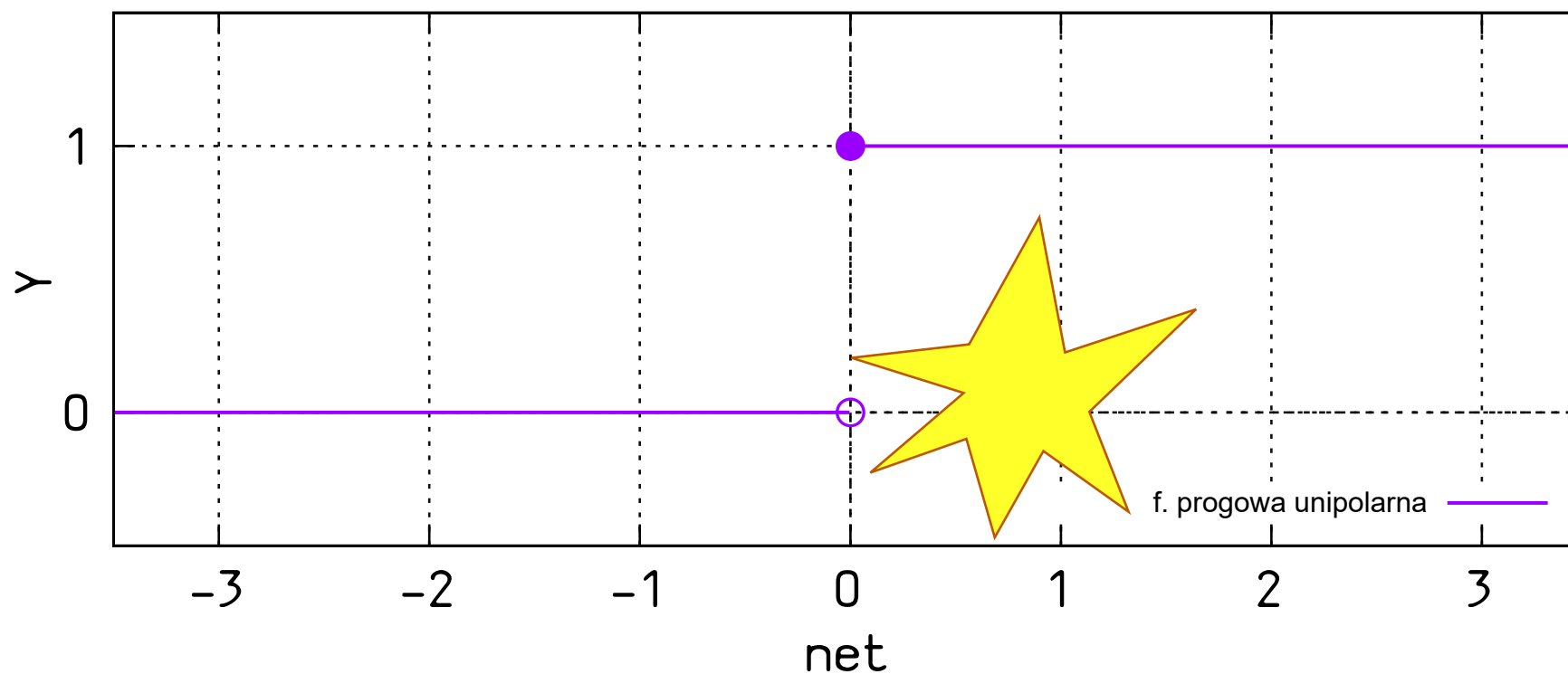
$$F(net) = \begin{cases} 1, & \text{gdy } net \geq 0, \\ 0, & \text{gdy } net < 0. \end{cases}$$



Sztuczne sieci neuronowe

Funkcje aktywacji – funkcja progowa

Funkcja aktywacji w sztucznych sieciach neuronowych jest odpowiednikiem biologicznego progu aktywacji neuronu.

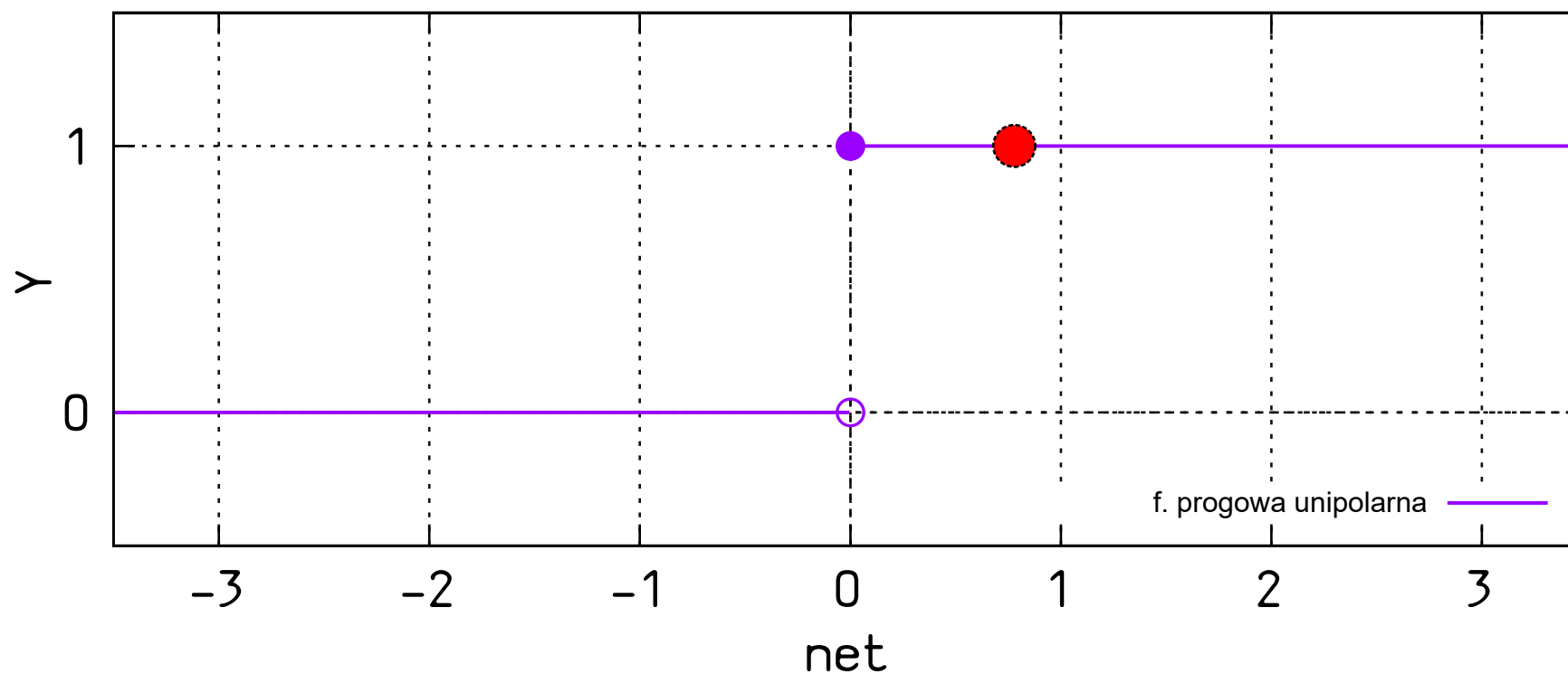


$$F(net) = \begin{cases} 1, & \text{gdy } net \geq 0, \\ 0, & \text{gdy } net < 0. \end{cases}$$

Sztuczne sieci neuronowe

Funkcje aktywacji – funkcja progowa

Funkcja aktywacji w sztucznych sieciach neuronowych jest odpowiednikiem biologicznego progu aktywacji neuronu.



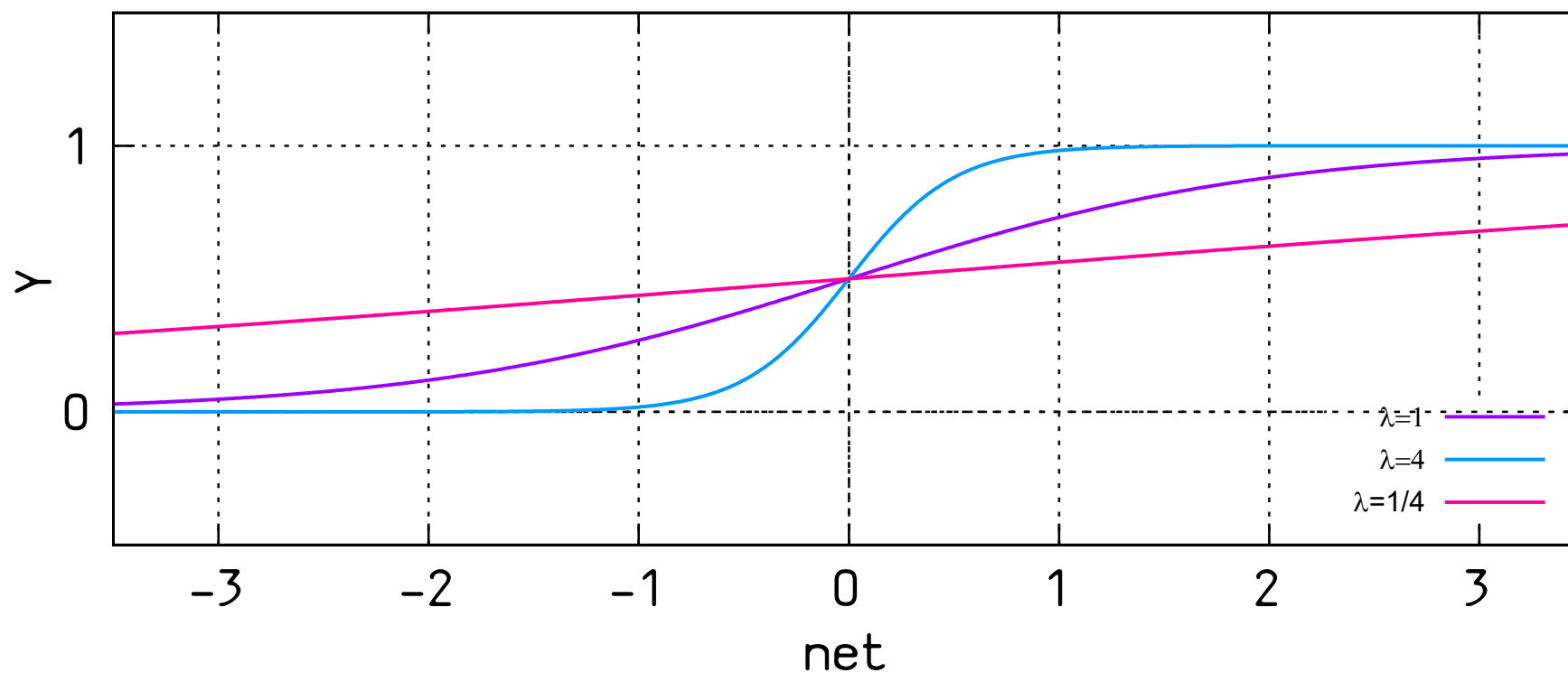
$$F(net) = \begin{cases} 1, & \text{gdy } net \geq 0, \\ 0, & \text{gdy } net < 0. \end{cases}$$



Sztuczne sieci neuronowe

Funkcje aktywacji – funkcja progowa

Ze względu na własności matematyczne w praktyce używamy funkcji ciągłych. Przykładem jest funkcja *sigmoidalna*:



$$F(net) = \frac{1}{1 + e^{-\lambda \cdot net}}$$



Sztuczne sieci neuronowe

Uczenie sieci – dane uczące

Sieć neuronowa uczy się na przykładach.

Potrzebujemy par **pytanie – odpowiedź**.

- Pytanie może uwzględniać wiele czynników (cech), jest to **wejście** do sieci.
- Odpowiedź to **wyjście** i również może być wektorem wieloelementowym.

Taki sposób nazywamy **uczeniem nadzorowanym** lub **uczeniem z nauczycielem**.

Proces nauki polega na zmianie wag w neuronach.



Sztuczne sieci neuronowe

Uczenie sieci – dane uczące

Zagadnienie:

Decyzja o włączeniu lub wyłączeniu ogrzewania.

Temperatura [°C]	Wilgotność [%]	Decyzja
21	60	Włącz
22	40	Włącz
23	30	Włącz
25	20	Włącz
22	60	Wyłącz
23	40	Wyłącz
24	50	Wyłącz
25	30	Wyłącz
26	40	Wyłącz
x_1	x_2	Y

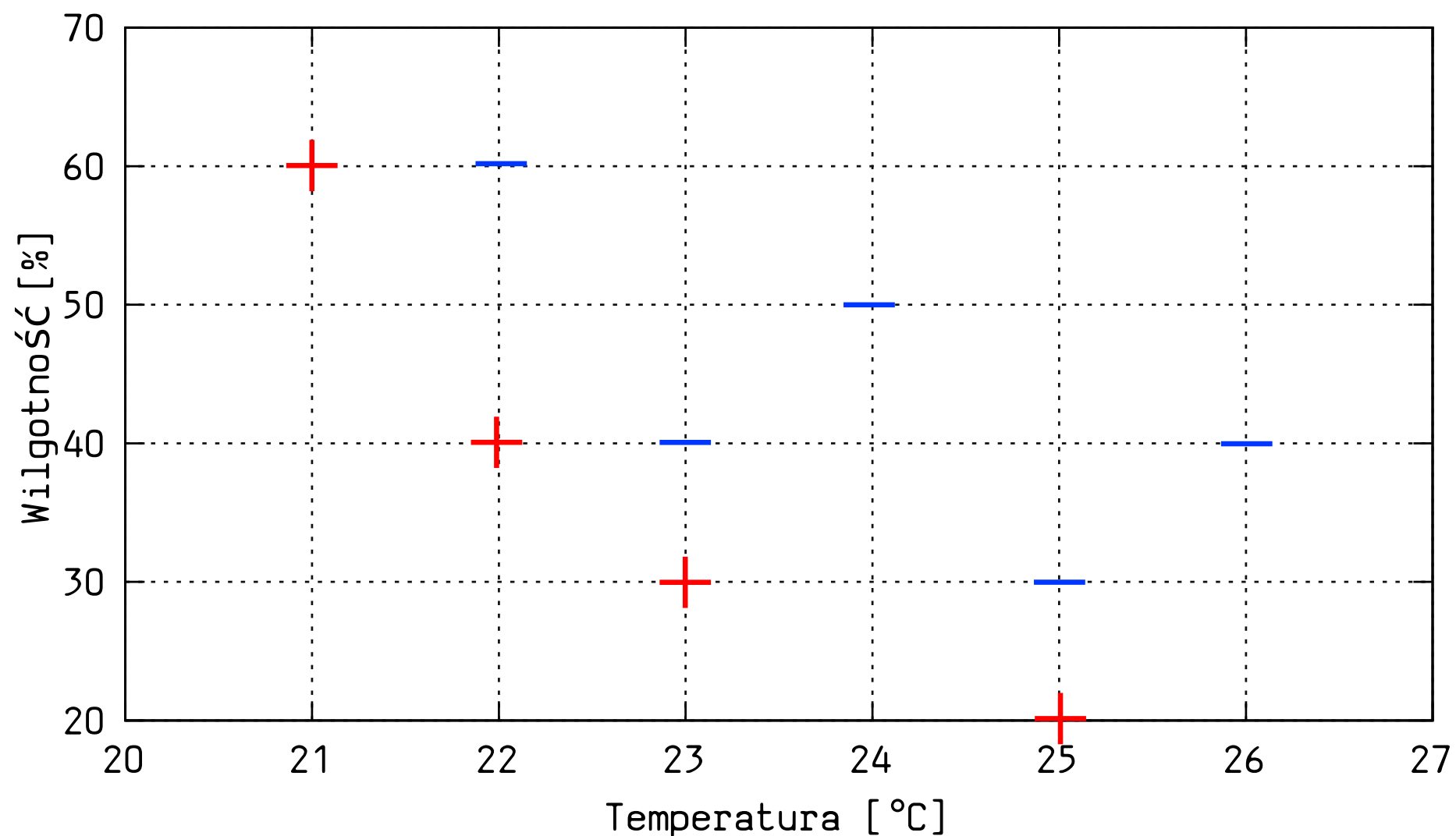


Sztuczne sieci neuronowe

Uczenie sieci – dane uczące

Zagadnienie:

Decyzja o włączeniu lub wyłączeniu ogrzewania.

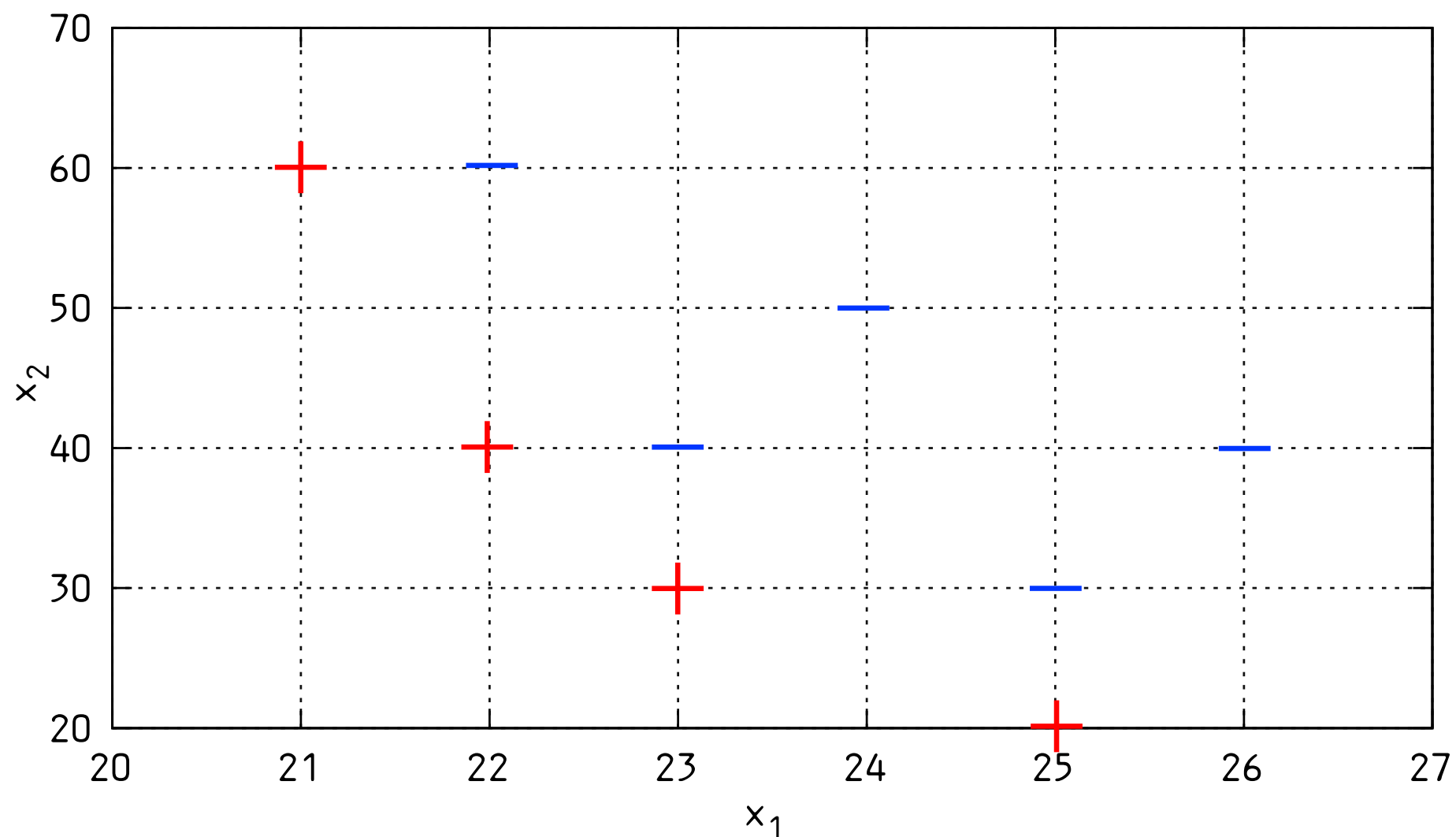


Sztuczne sieci neuronowe

Uczenie sieci – dane uczące

Zagadnienie:

Decyzja o włączeniu lub wyłączeniu ogrzewania.

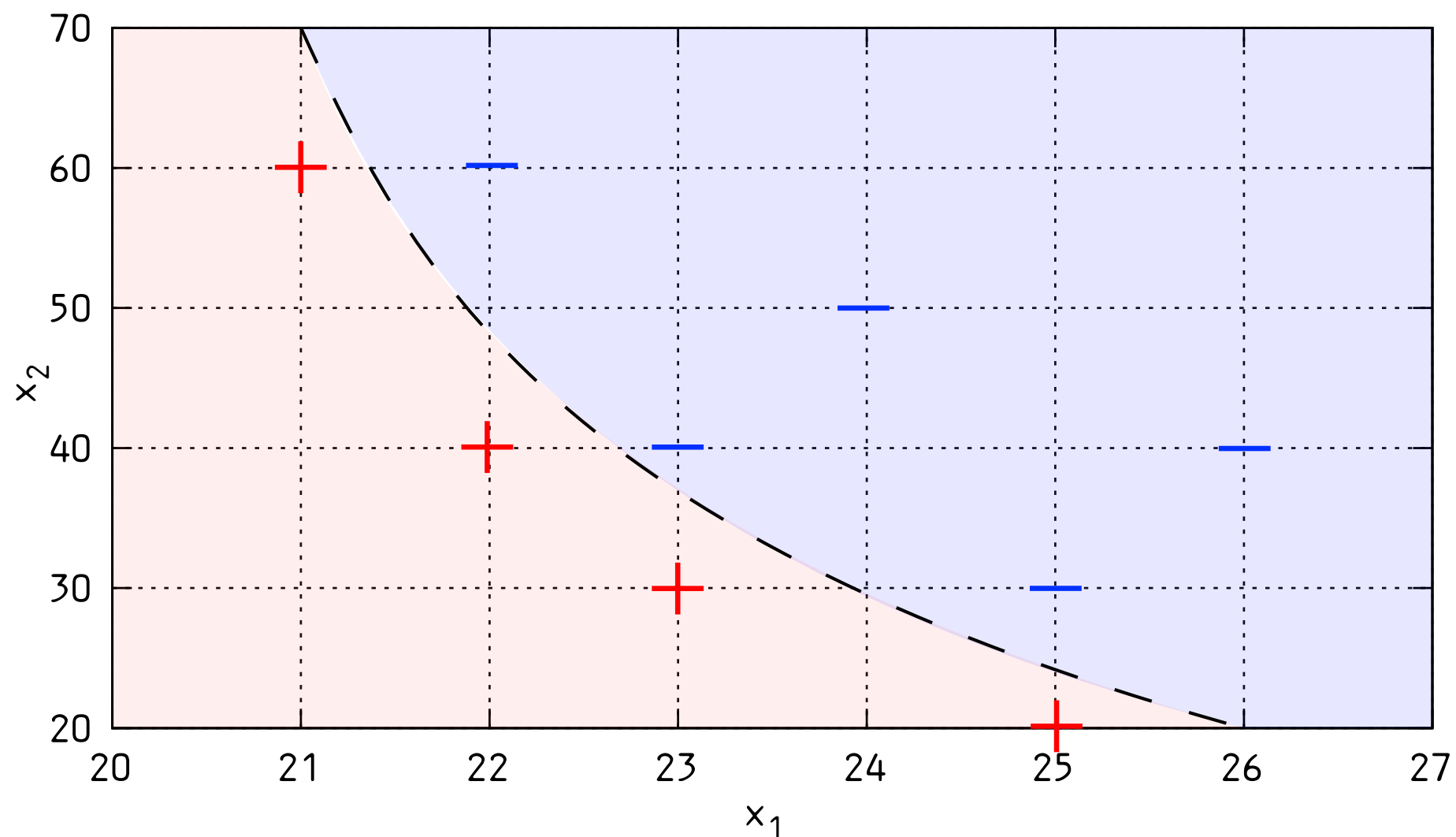


Sztuczne sieci neuronowe

Uczenie sieci – dane uczące

Zagadnienie:

Decyzja o włączeniu lub wyłączeniu ogrzewania.

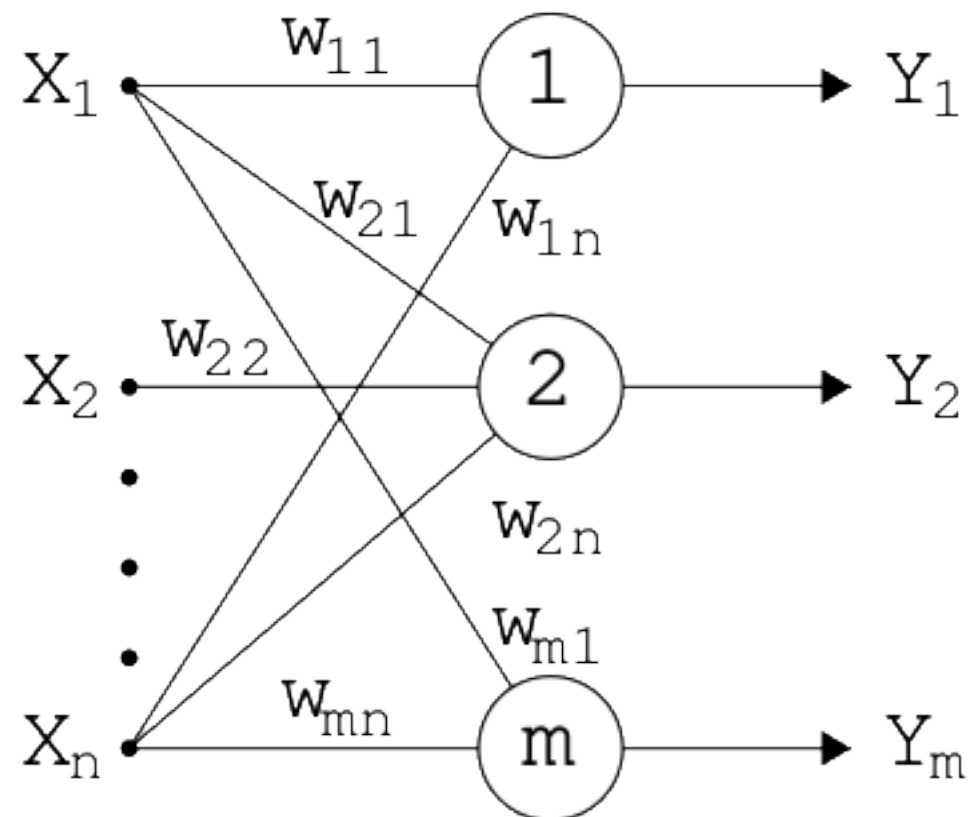


Sztuczne sieci neuronowe

Architektury sztucznych sieci neuronowych

Sieć jednowarstwowa, jak wskazuje nazwa, zawiera neurony ułożone w jednej warstwie, które zwykle mają pełne połączenie z każdym wejściem w sieci.

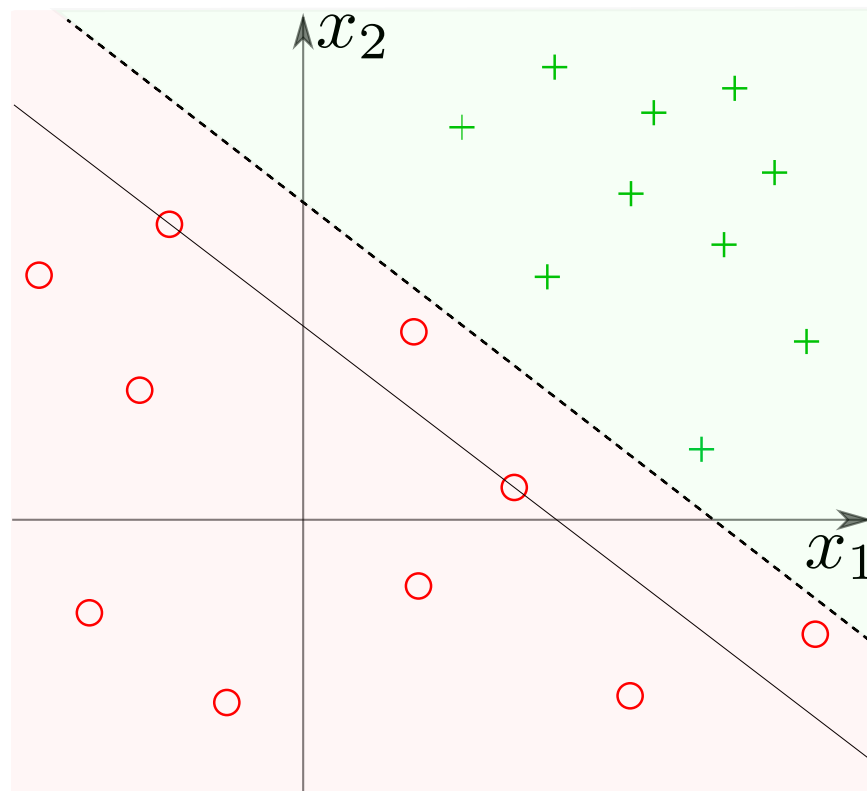
Przepływ sygnałów odbywa się w jednym kierunku – z wejścia do wyjścia.



Sztuczne sieci neuronowe

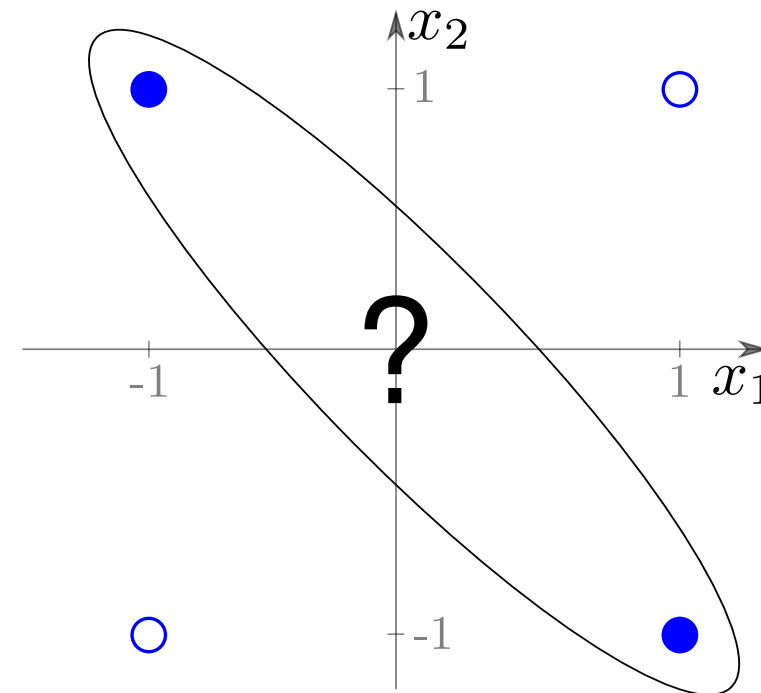
Architektury sztucznych sieci neuronowych

Sieć jednowarstwowa rozwiązuje problemy separowalne liniowo.



Sztuczne sieci neuronowe

Architektury sztucznych sieci neuronowych



Do odwzorowania funkcji XOR potrzebna jest więcej niż jedna płaszczyzna oddzielająca klasy (w tym wypadku prosta).

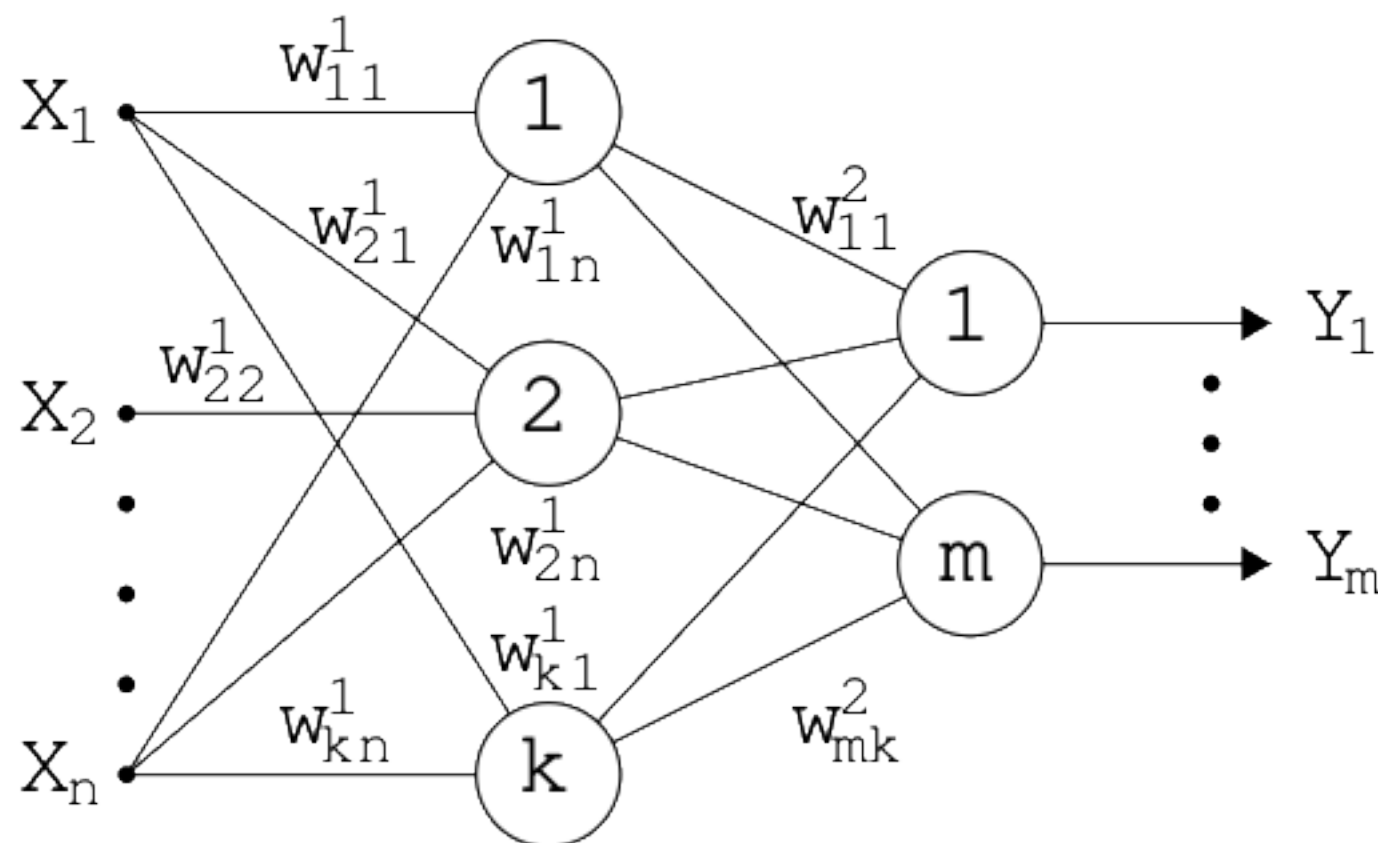


Sztuczne sieci neuronowe

Architektury sztucznych sieci neuronowych

Sieć wielowarstwowa zawiera co najmniej jedną warstwę neuronów **ukrytych**, czyli takich które pośredniczą w przekazywaniu sygnałów pomiędzy węzłami wejściowymi, a warstwą wyjściową.

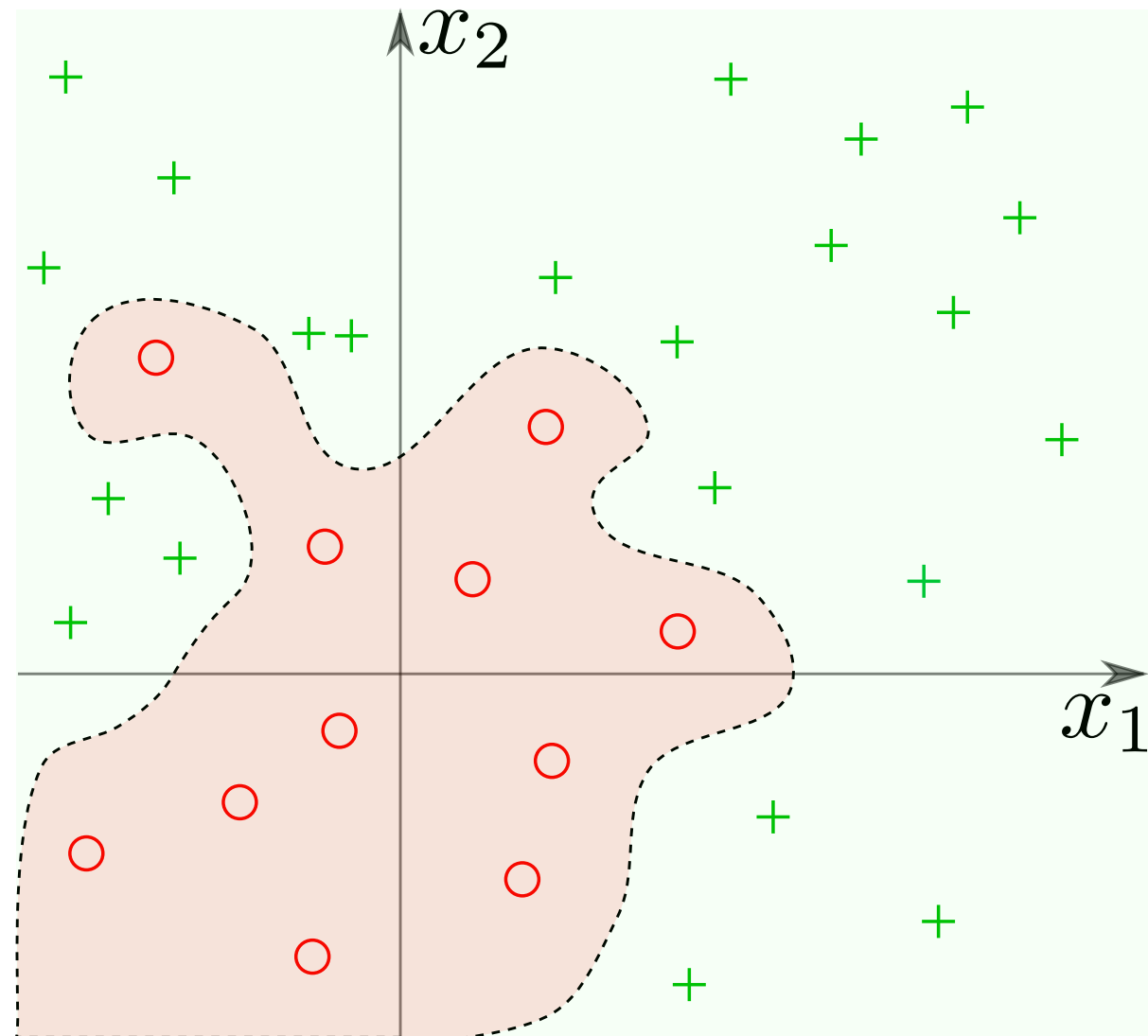
Także i w tym przypadku przepływ sygnałów odbywa się w jednym kierunku – z wejścia do wyjścia.



Sztuczne sieci neuronowe

Architektury sztucznych sieci neuronowych

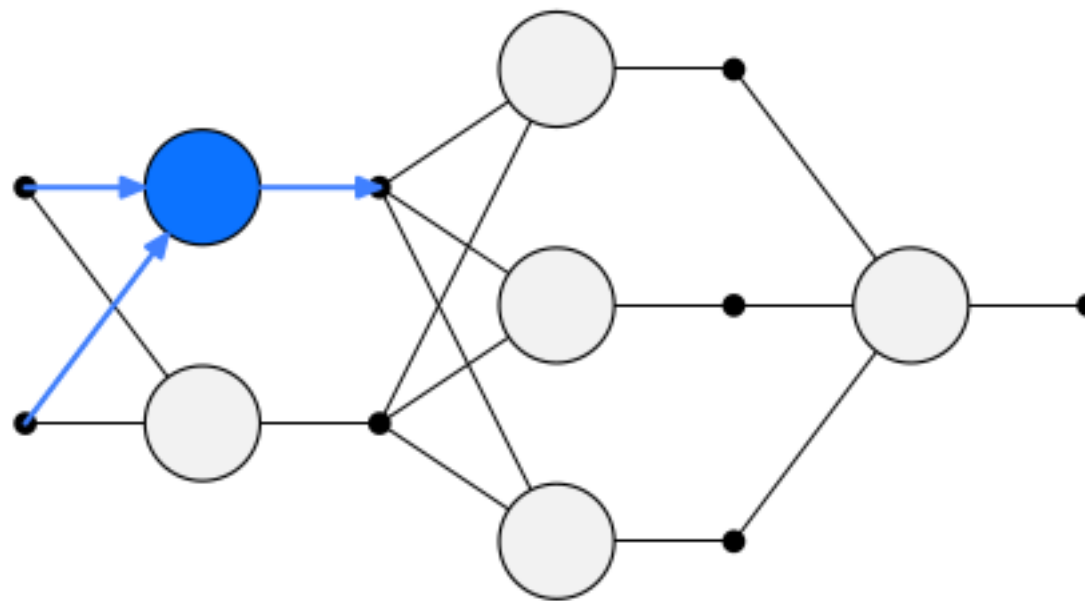
Sieci wielowarstwowe potrafią rozwiązać problemy, które **nie są separowalne liniowo**.



Sztuczne sieci neuronowe

Działanie sieci wielowarstwowej skierowanej do przodu

Obliczamy wyjście kolejnych neuronów w danej warstwie. Wartości te są wejściami do neuronów w następnej warstwie.



$$net_1^1 = w_{11}^1 x_1^1 + w_{12}^1 x_2^1$$

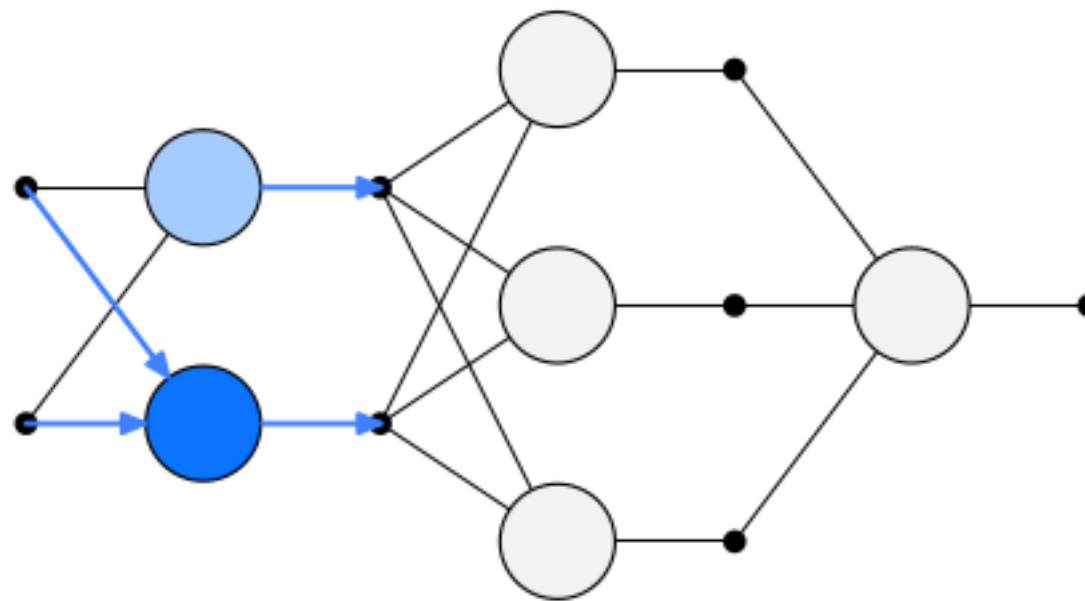
$$y_1^1 = f(net_1^1) = x_1^2$$



Sztuczne sieci neuronowe

Działanie sieci wielowarstwowej skierowanej do przodu

Obliczamy wyjście kolejnych neuronów w danej warstwie. Wartości te są wejściami do neuronów w następnej warstwie.



$$net_2^1 = w_{21}^1 x_1^1 + w_{22}^1 x_2^1$$

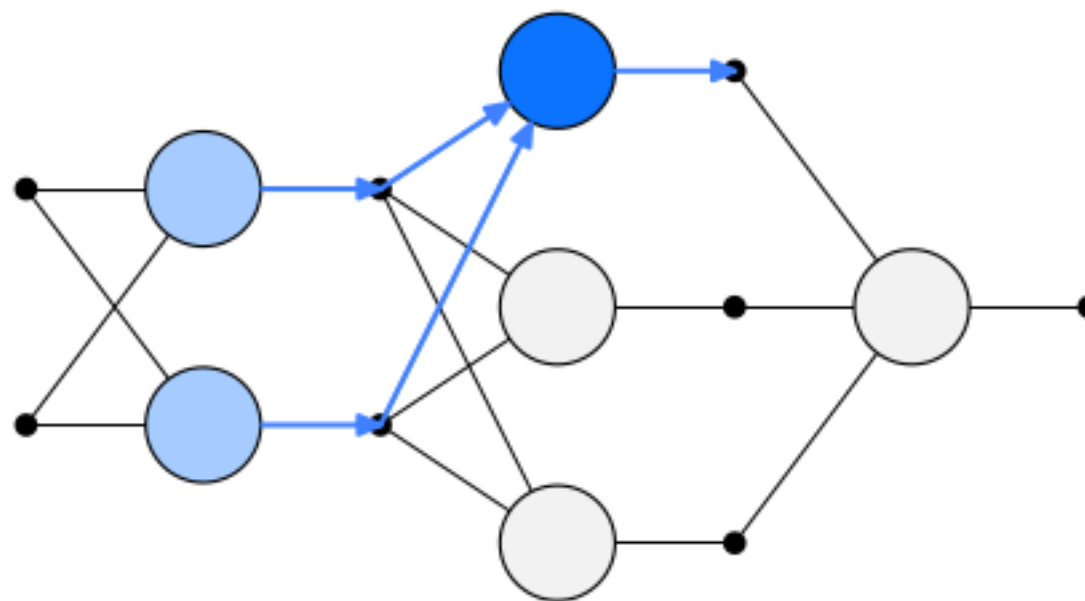
$$y_2^1 = f(net_2^1) = x_2^2$$



Sztuczne sieci neuronowe

Działanie sieci wielowarstwowej skierowanej do przodu

Obliczamy wyjście kolejnych neuronów w danej warstwie. Wartości te są wejściami do neuronów w następnej warstwie.



$$net_1^2 = w_{11}^2 x_1^2 + w_{12}^2 x_2^2$$

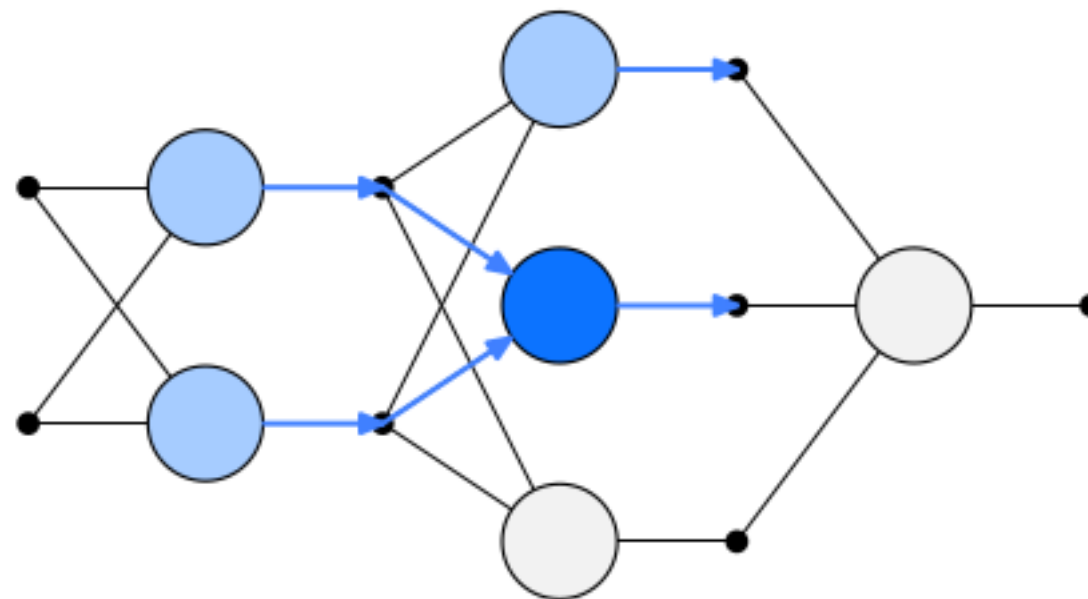
$$y_1^2 = f(net_1^2) = x_1^3$$



Sztuczne sieci neuronowe

Działanie sieci wielowarstwowej skierowanej do przodu

Obliczamy wyjście kolejnych neuronów w danej warstwie. Wartości te są wejściami do neuronów w następnej warstwie.



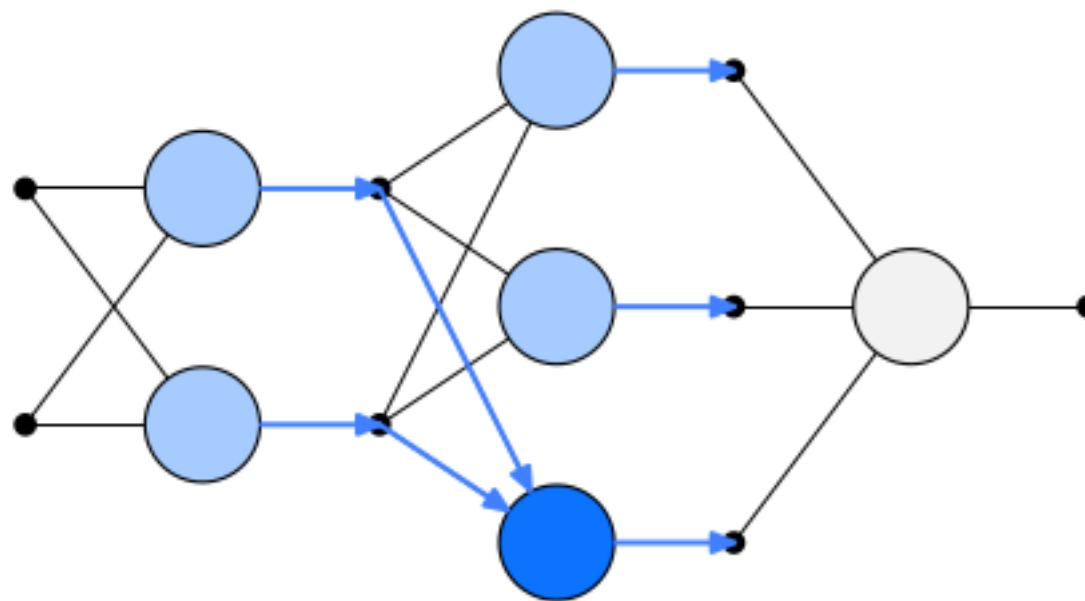
$$net_2^2 = w_{21}^2 x_1^2 + w_{22}^2 x_2^2$$

$$y_2^2 = f(net_2^2) = x_2^3$$

Sztuczne sieci neuronowe

Działanie sieci wielowarstwowej skierowanej do przodu

Obliczamy wyjście kolejnych neuronów w danej warstwie. Wartości te są wejściami do neuronów w następnej warstwie.



$$net_3^2 = w_{31}^2 x_1^2 + w_{22}^2 x_2^2$$

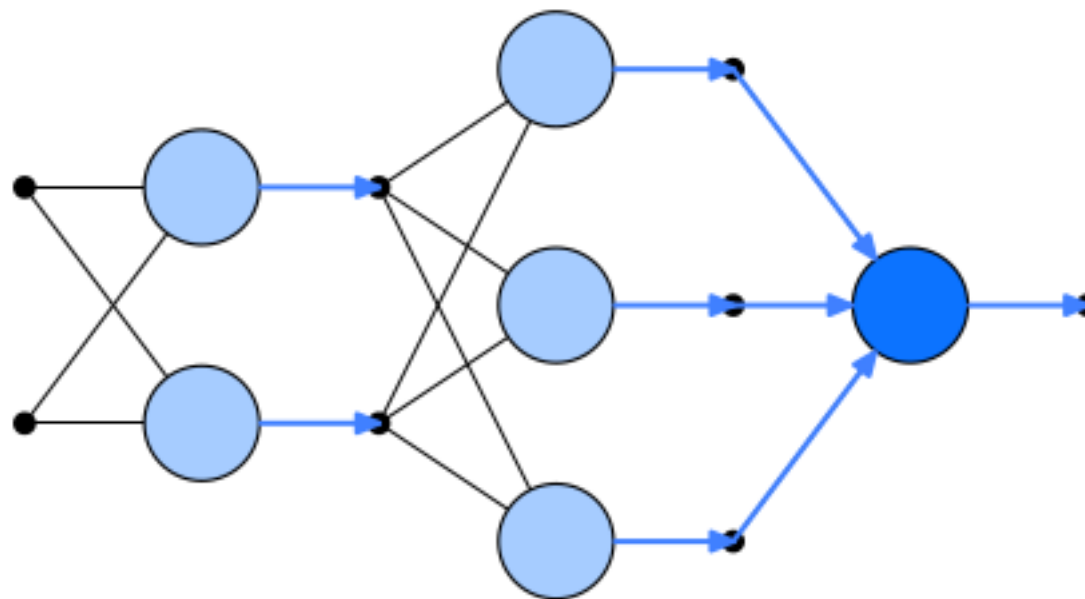
$$y_3^2 = f(net_3^2) = x_3^3$$



Sztuczne sieci neuronowe

Działanie sieci wielowarstwowej skierowanej do przodu

Obliczamy wyjście kolejnych neuronów w danej warstwie. Wartości te są wejściami do neuronów w następnej warstwie.



$$net_1^3 = w_{11}^3 x_1^3 + w_{12}^3 x_2^3 + w_{13}^3 x_3^3$$

$$y_1^3 = f(net_1^3) = y$$



Sztuczne sieci neuronowe

Uczenie sieci



Początkowo ustalamy wagi w na małe wartości losowe, np. w zakresie $[-1, 1]$.

Podstawowy algorytm uczenia sieci to **propagacja wsteczna**. Wyznacza on zmianę wag połączeń w sieci.

W przeciwieństwie do obliczenia odpowiedzi Y sieci, zmianę wag zaczynamy od końca (od ostatniej, wyjściowej, warstwy).

Algorytm jest oparty na minimalizacji sumy kwadratów błędów z wykorzystaniem metody optymalizacyjnej.



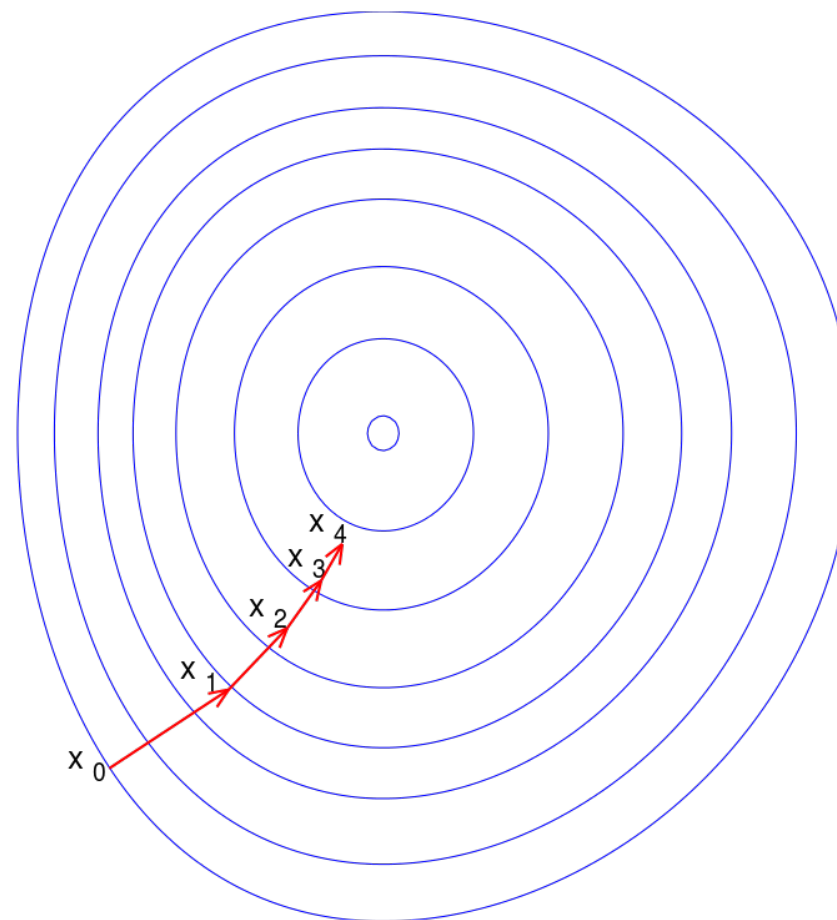
Sztuczne sieci neuronowe

Uczenie sieci

Do obliczeń potrzebnych do nauki sieci potrzebna jest jeszcze *pochodna* funkcji aktywacji neuronów. Dla funkcji sigmoidalnej jej wzór to:

$$f'(net) = \lambda \cdot f(net)(1 - f(net))$$

Dzięki pochodnej możemy optymalizować wagi sieci, krok po kroku.



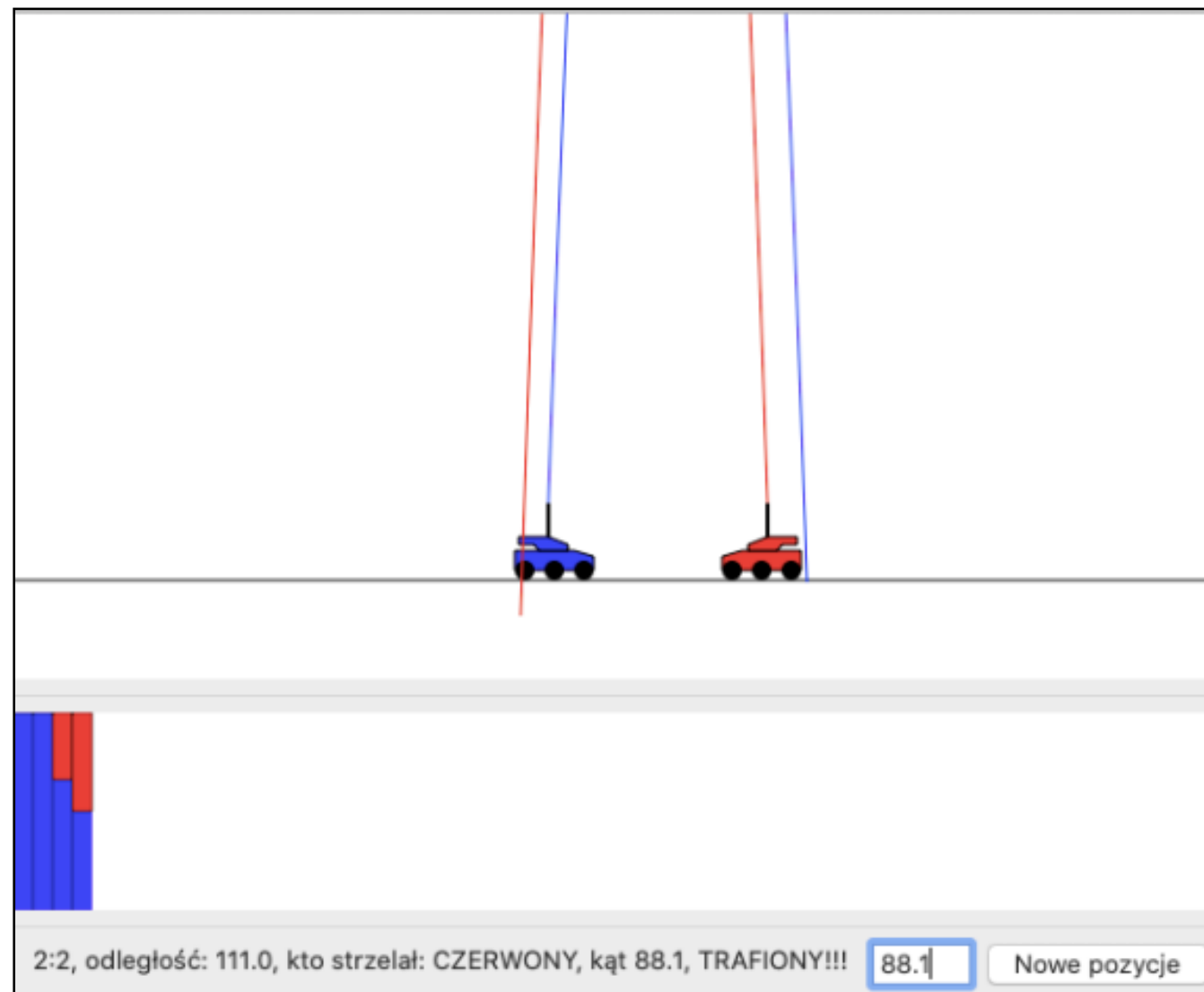
Część praktyczna

Część praktyczna

Uczenie sieci



Zadanie polega na nauczaniu sieci neuronowej, która będzie mogła grać w grę „czołgi”.

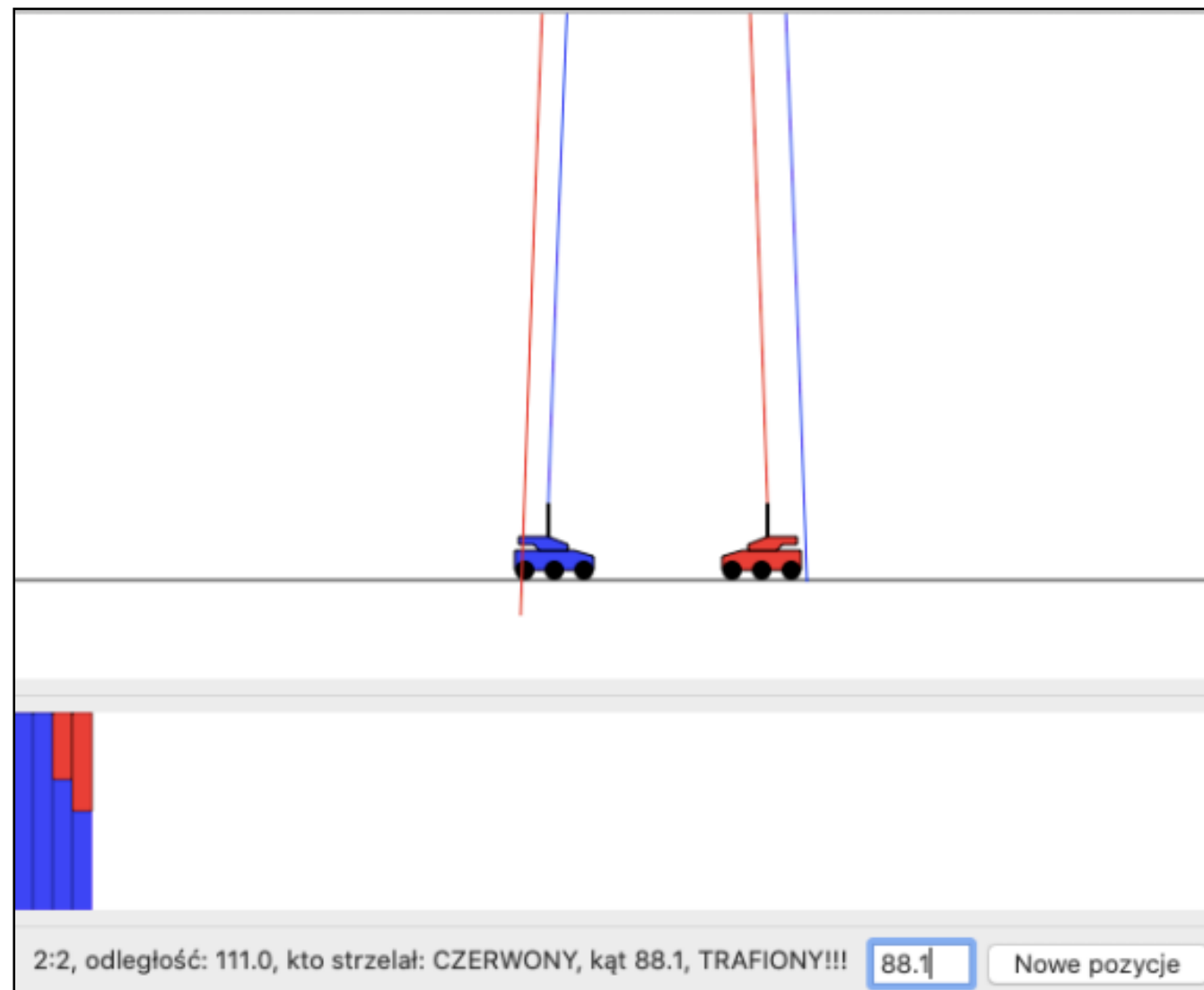


Część praktyczna

Uczenie sieci



Na podstawie odległości między czołgami należy wyznaczyć kąt wystrzału pocisku.

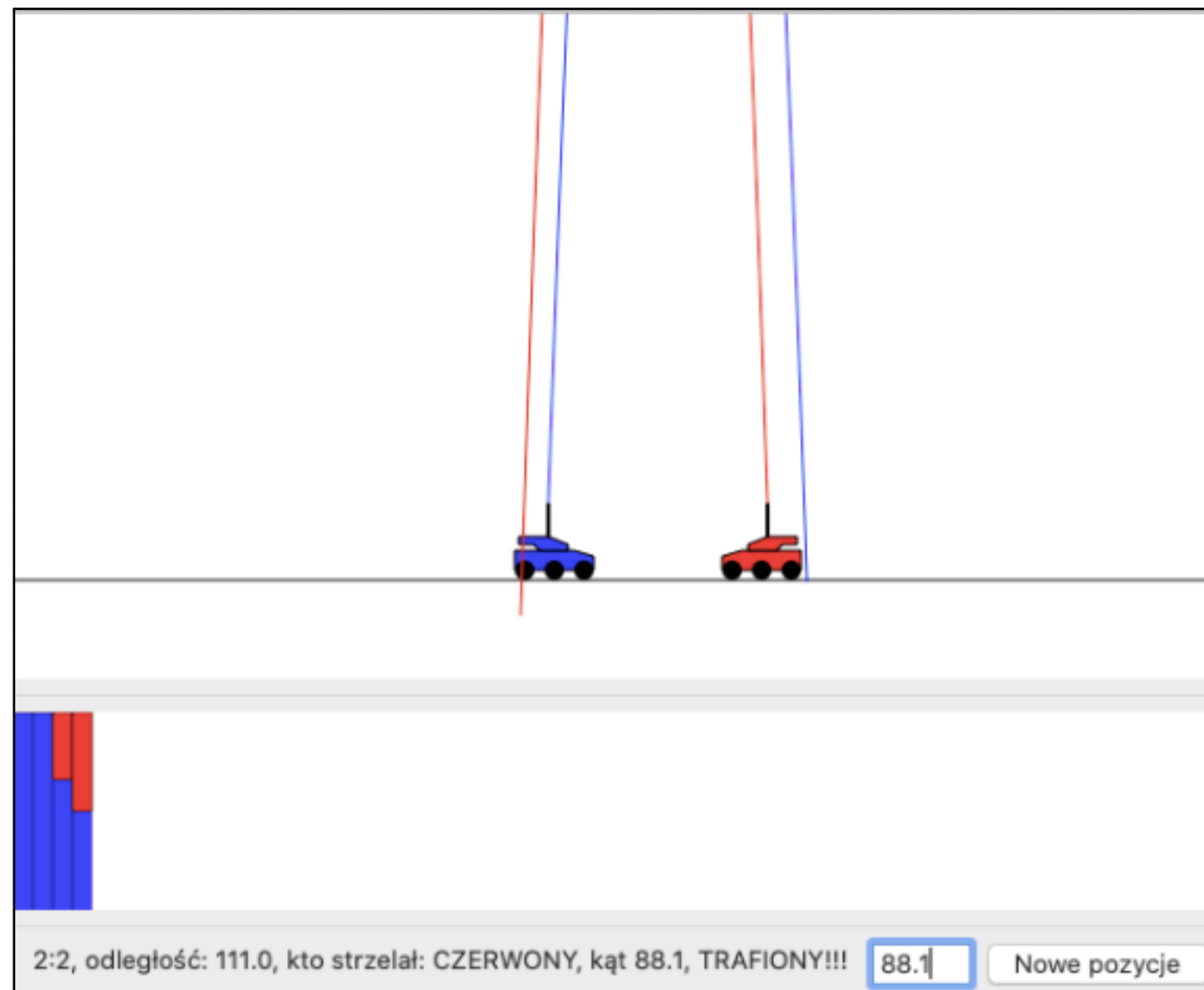


Część praktyczna

Uczenie sieci

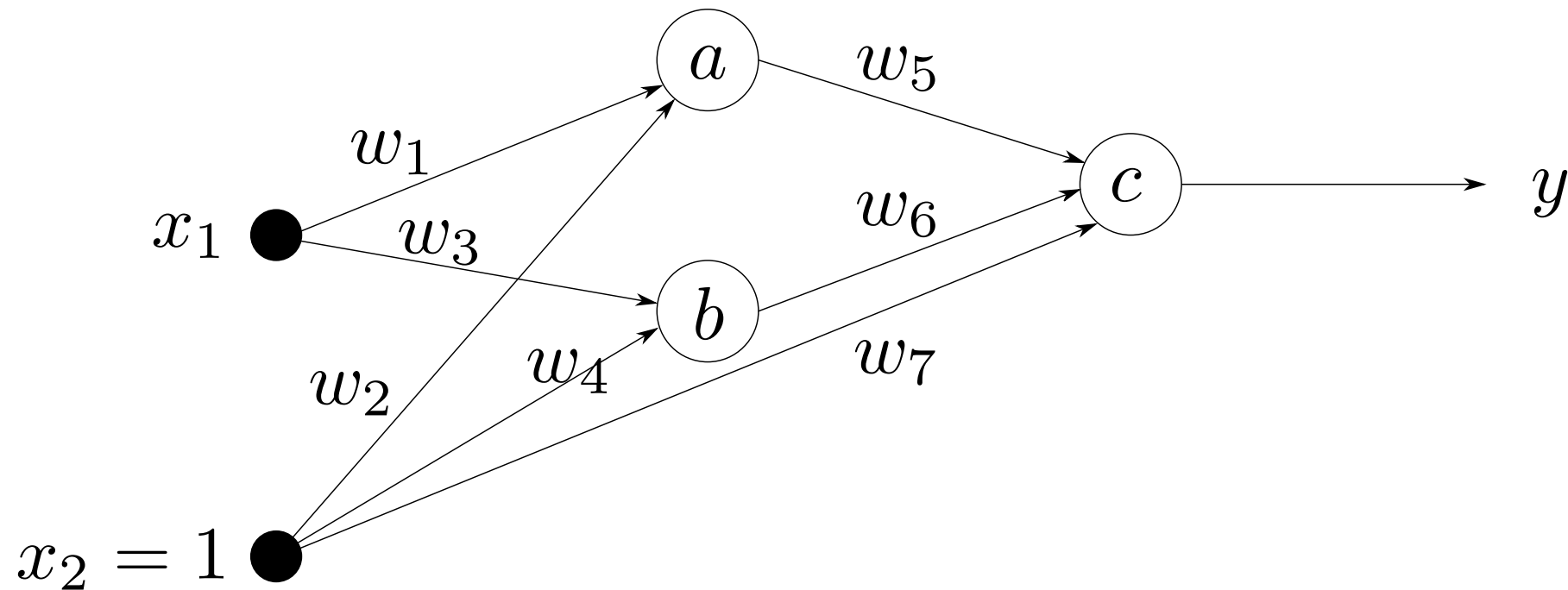


Sieć nauczy się tego odwzorowania na podstawie trafnych wystrzałów (dane uczące).



Część praktyczna

Struktura sieci (dla ciekawskich)



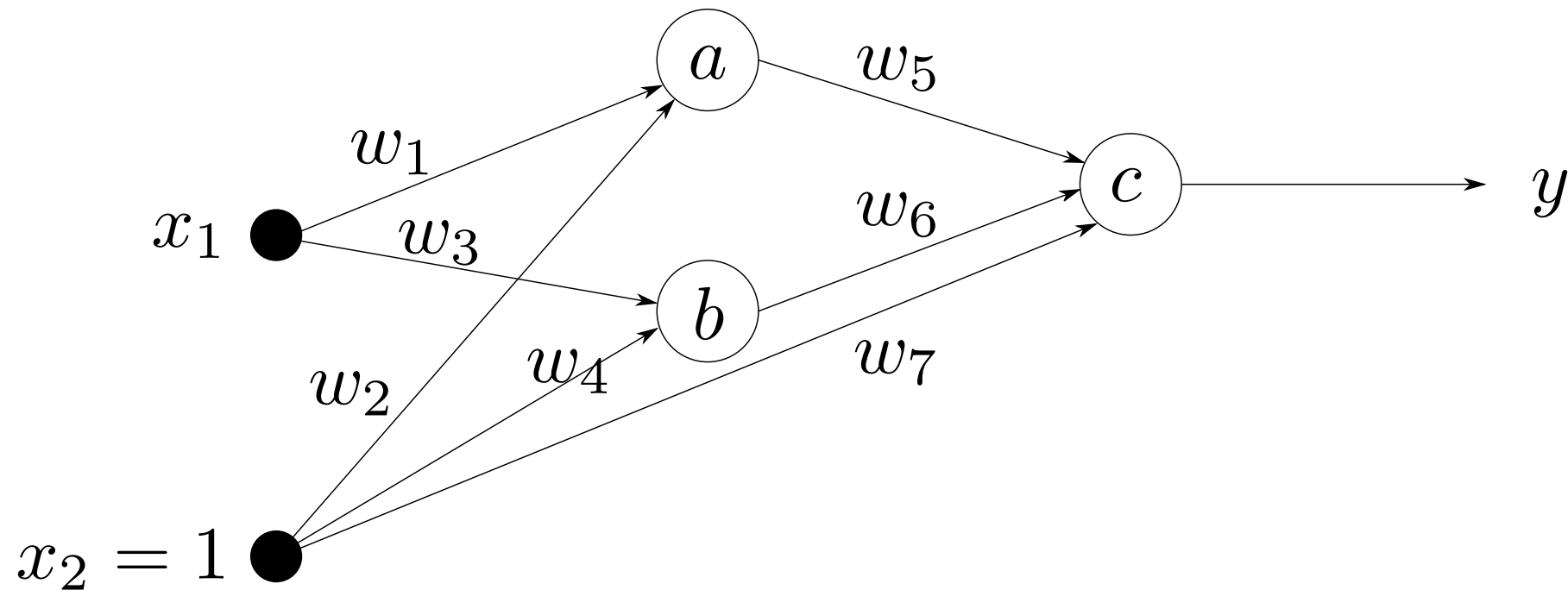
Sieć składa się z dwóch warstw i trzech neuronów:

- a, b – w warstwie ukrytej,
- c – w warstwie wyjściowej.



Część praktyczna

Struktura sieci (dla ciekawskich)



Sieć posiada dwa wejścia i jedno wyjście:

- x_1 to wejście do sieci, czyli **odległość**,
- x_2 to dodatkowe wejście o **stałe** wartości 1,
- y to wyjście z sieci, czyli **kąt**.



Część praktyczna

Naucz się i ...



<https://fulmanski.pl/zajecia/prezentacje/festiwalnauki2023/index.htm>

